

## Optimering av kalkcykeln på Iggesunds bruk med avseende på specifik energianvändning

- *Optimisation of the lime cycle at Iggesund Mill concerning specific energy consumption*

David Olsson

Civilingenjörsprogrammet i energisystem

# Optimering av kalkcykeln på Iggesunds bruk med avseende på specifik energianvändning

Optimisation of the lime cycle at Iggesund Mill concerning specific energy consumption

David Olsson

**Handledare:** Magnus Jonell och Sten Valeur, Iggesunds bruk  
**Ämnesgranskare:** Gunnar Larsson, institutionen för energi och teknik, SLU  
**Examinator:** Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU

**Omfattning:** 30 hp

**Nivå, fördjupning och ämne:** Avancerad nivå, A2E, teknik

**Kurstitel:** Examensarbete i energisystem

**Kurskod:** EX0724

**Program/utbildning:** Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

**Kurskoordinerande institution:** Institutionen för energi och teknik

**Utgivningsort:** Uppsala

**Utgivningsår:** 2020

**Serietitel:** Examensarbete ( Institutionen för energi och teknik, SLU)

**Delnummer i serien:** 2020:02

**ISSN:** 1654-9392

**Elektronisk publicering:** <http://stud.epsilon.slu.se>

**Nyckelord:** energieffektivisering, mesaugn, elfilterstoft, sulfatmassa, kartongbruk

---

Sveriges lantbruksuniversitet  
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap  
Institutionen för energi och teknik



# Abstract

Iggesund Mill is an integrated pulp and paperboard mill that makes kraft pulp and solid bleached board. In the pulp process, white liquor is used to make pulp. The white liquor is recovered in the recovery process. One step of the recovery process is the lime kiln where calcium oxide is made by heating up the residue, calcium carbonate, to 1,200 °C.

In this master thesis two proposals are examined to lower the specific energy consumption in the lime kiln. The two proposals are: to raise the height of the dam in the lime kiln and to bleed out dust from the electrostatic precipitator. The goal is to clarify if it is economically feasible to bleed out dust from the electrostatic precipitator and to recommend an optimal height of the dam in the lime kiln.

During the work a mapping of lime kilns in other Swedish kraft pulping mills has been made and meetings with the lime kiln manufacturer and a lime kiln consultant have been held. Samples of the lime, lime mud and dust from the electrostatic precipitator have been taken and sent for analyses to find out the chemical compositions. Simulations and calculations have been made in MATLAB.

The result shows that a higher dam will lower the specific energy consumption with approximate 200 MJ/ton produced lime. The other proposal, to bleed out dust from the electrostatic precipitator, will lower the energy consumption as well. The optimal amount to lower the energy consumption is to bleed out 2.7 kg/ton produced lime and will lower the specific energy consumption with approximate 45 MJ/ton produced lime. This will save 200,000–260,000 SEK per year for an investment cost of 350,000–400,000 SEK.

The conclusion is that the recommended dam height for the lime kiln in Iggesund Mill is 72–80 cm. The optimal amount of dust from the electrostatic precipitator to bleed out is 2.7 kg/ton produced lime.



## Populärvetenskaplig sammanfattning

Iggesunds bruk är ett integrerat massa- och kartongbruk som tillverkar kemisk massa samt helblekt premiumkartong. I massatillverkningen friläggs fibrerna genom att de kokas i vitlut. Fibrerna går efter det vidare till blekning medan luten återvinns i kemikalieåtervinningen. I kemikalieåtervinningen ingår mesaugnen som är en roterugn bestående av ett långt, långsamt roterande och svagt lutande rör med en brännare i ena änden. I mesaugnen produceras kalciumoxid till kemikalieåtervinningen genom att restprodukten kalciumkarbonat hettas upp till 1 200 °C, vilket leder till att den spjälkas till kalciumoxid och koldioxid.

I detta arbete har två förslag till att energieffektivisera Iggesunds bruks mesaugn utretts: att höja mesaugnens tröskel och att blöda ut elfilterstoft. Tröskeln är en uppdämning som ger en ökad uppehållstid i ugnen, men en högre tröskel befarades medföra nackdelar som bland annat en ökad damning. Att blöda ut elfilterstoft gör att mängden inerta ämnen som anrikas i kalkcykeln (som mesaugnen ingår i) kan minskas, men man tappar även kalk som därmed behöver köpas in för att ersättas. Slutsatsen från arbetet är att båda förslagen kan rekommenderas. En utblödning på 2,7 kg elfilterstoft per ton producerad kalk beräknas vara optimalt att blöda ut för att lägga på deponi och skulle medföra en årsbesparing på 200 000 – 260 000 SEK till en investeringskostnad på 350 000 – 400 000 SEK. Det skulle även sänka den specifika energianvändningen med ungefär 45 MJ per producerad ton kalk. Den rekommenderade tröskelhöjden är 72–80 cm med en uppskattad energibesparing på ungefär 200 MJ/ton kalk. De befarade nackdelarna bedöms heller inte vara allvarligare än att de kan hanteras.

Nyckelord: Energieffektivisering, mesaugn, elfilterstoft, sulfatmassa, kartongbruk

## Exekutiv sammanfattning

Projektets syfte var att undersöka den tekniska och ekonomiska potentialen att minska mesaugnens energianvändning genom de två förslagen: att utblöda elfilterstoft från mesaugnen och att höja mesaugnens tröskel. Målet var att ge en rekommendation till en optimal tröskelhöjd i mesaugnen samt klarlägga huruvida det är ekonomiskt lönsamt att blöda ut elfilterstoft.

Tröskeln är en uppdämning som ger en ökad uppehållstid i ugnen, men en högre tröskel befarades medföra nackdelar som bland annat en ökad damning. I kalkcykeln sker en anrikning av inerta ämnen som vid en utblödning av elfilterstoft skulle kunna minskas, men då förloras kalk som därmed behöver köpas in för att ersättas.

Tröskeln i Iggesunds bruks mesaugn var ursprungligen 61 cm över mantelplåten. Den har dock nött ner och mätningar har visat sig att den vid sitt mest nednötta ställe i nuläget är 53,5 cm. Jämfört med andra svenska sulfatmassabruk har Iggesund en låg kvot mellan tröskelhöjd och ugnsdiameter i mesaugnen och en specifik energianvändning som är lite över snittet.

En modell över mesaugnen har konstruerats i MATLAB och visar att en högre tröskelhöjd skulle ge en lägre specifik energianvändning vid samma produktion. Leverantören av mesaugnen rekommenderar dock att inte höja tröskeln till 93 cm eftersom vikten då skulle bli högre än vad komponenterna är specificerade att klara. Det skulle även leda till en ökad hastighet på sekundärluften, och brännaren bör därför justeras till de nya betingelserna. Damningen kommer mest sannolikt huvudsakligen ifrån kylaren, och där kommer förhållandena inte förändras så länge produktionen hålls på samma nivå. Därmed kommer sannolikt damningen inte påverkas mer än marginellt av en högre tröskel. Ytterligare en fördel med en högre tröskel är att ugnens maximala kapacitet skulle öka. Nackdelen med att öka kapaciteten är att det skulle ske på bekostnad av en bättre energieffektivitet hos ugnen och en ökad damning i ugnen.

Kostnaden för att höja tröskeln är 700 000 – 800 000 SEK och projektets slutsats är att en höjning av tröskeln till 72–80 cm rekommenderas. Enligt beräkningsmodellen skulle detta sänka den specifika energianvändningen med 120–220 MJ/ton kalk om dagens produktionsnivå bibehålls.

Kalken i Iggesunds bruk innehåller 1,23 % av det inerta ämnet fosfor och elfilterstoftet vid uttaget på mitten av elfiltret innehåller 2,22 % fosfor. Beräkningar visar att utan deponeringsavgift skulle en utblödning på 3,0 kg elfilterstoft per ton producerad kalk ge maximal ekonomisk besparing. Fosforhalten i mesan skulle då bli 0,70 % och besparingen skulle bli 47 MJ/ton kalk och 2,8 SEK/ton kalk. Med en deponeringsavgift på 100 SEK/ton skulle den optimala utblödningen vara 2,7 kg elfilterstoft per ton producerad kalk, fosforhalten skulle bli 0,73 % och besparingen 45 MJ/ton kalk och 2,5 SEK/ton kalk.

Det har även utförts ett experiment för att undersöka om elfilterstoft kan användas till att pH-justera restsyra. Experimentet visar att det går, men det bildades en grå och trögflytande

produkt av kalciumfosfat och vidare studier krävs för att fastställa om metoden är att rekommendera.

Den maximala årsbesparingen exklusive och inklusive deponering blir vid den produktionen 260 000 respektive 230 000 SEK. En systemlösning för att ta ut stoft och skicka till deponi skulle kosta ungefär 350 000 – 400 000 SEK. Av andra svenska sulfatmassabruk har 7 av 16 en utblödning av elfilterstoft. Rekommendationen är att Iggesunds bruk installerar en utblödning av elfilterstoft.

Projektets slutsats är därmed att Iggesund rekommenderas att höja tröskeln till 72–80 cm och att bygga en utblödning och lägga avsättningen på deponi.



## **Förord**

Denna rapport är ett examensarbete och avslutande del på civilingenjörsprogrammet i energisystem på Uppsala Universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Examensarbetet har utförts åt Iggesunds bruk och huvudsakligen har det utförts på plats i Iggesund.

Jag vill rikta ett särskilt tack till mina handledare Magnus Jonell och Sten Valeur för den vägledning och de goda råd ni gett under arbetets gång. Ett stort tack till Konsulten för alla bra synpunkter under de samtal och mailväxlingar som vi haft. Jag vill även tacka Ugnslieferantören samt alla bruk som svarat på frågor om deras mesaugnar, för den input som ni har bidragit med. Tack också till personalen på sektionen Energi och Återvinning för den kunskap och inspiration som ni gett och till Iggesunds bruk för möjligheten att göra detta arbete hos er. Slutligen vill jag tacka min ämnesgranskare Gunnar Larsson för handledning och goda råd.

Uppsala, december 2019.

David Olsson

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning .....</b>	<b>1</b>
1.1	Syfte, mål och frågeställningar .....	1
1.2	Genomförande och avgränsningar .....	1
<b>2</b>	<b>Bakgrund .....</b>	<b>2</b>
2.1	Pappersmassa .....	2
2.1.1	Sulfatmassa .....	2
2.1.2	Sulfatmassafabrikens kemikalieåtervinning .....	2
2.2	Restsyra .....	5
<b>3</b>	<b>Teori .....</b>	<b>6</b>
3.1	Tröskelhöjd .....	6
3.1.1	Kemisk reaktion .....	6
3.1.2	Volym .....	6
3.1.3	Yta .....	7
3.1.4	Uppehållstid .....	8
3.1.5	Temperaturförändring .....	8
3.2	Utblödning av elfilterstoft .....	8
3.2.1	Elektrostatiska stoftavskiljare .....	9
3.2.2	Fosfor i processen .....	9
3.2.3	Fosforbalans .....	9
3.2.4	Volym förbränningsgas .....	10
3.2.5	Kalciumkarbonat löslighet .....	10
<b>4</b>	<b>Metod .....</b>	<b>12</b>
4.1	Omvärldsanalys .....	12
4.1.1	Kartläggning av andra bruk .....	12
4.1.2	Kontakter med konsult och leverantör .....	12
4.2	Tröskelhöjd .....	12
4.2.1	Mätning av tröskelhöjd .....	12
4.2.2	Beräkningsmodell .....	12
4.3	Utblödning av elfilterstoft .....	14
4.3.1	Provtagningar av elfilterstoft .....	14
4.3.2	Experiment att pH-justera restsyra .....	14
4.3.3	Beräkningar .....	15
<b>5</b>	<b>Resultat .....</b>	<b>16</b>
5.1	Tröskelhöjd .....	16
5.1.1	Spjälkningstemperatur .....	16
5.1.2	Mätning av tröskelhöjd .....	16
5.1.3	Andra bruk .....	17
5.1.4	Mängd sekundärluft .....	18
5.1.5	Beräkningsmodell .....	18
5.1.6	Kontakt med konsult och leverantör .....	20
5.2	Utblödning av elfilterstoft .....	21
5.2.1	Provtagning .....	21
5.2.2	Beräkningar .....	21
5.2.3	Andra bruk .....	24
5.2.4	Experiment att pH-justera restsyra .....	24
5.2.5	Systemlösning för uttag av elfilterstoft .....	25

<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>27</b>
6.1	Tröskelhöjd.....	27
6.2	Utblödning av elfilterstoft .....	28
6.3	Andra förbättringsförslag.....	29
6.3.1	Brännaren .....	29
6.3.2	Dosering av kalk.....	29
<b>7</b>	<b>Slutsats .....</b>	<b>30</b>
<b>Bilaga 1</b>	<b>.....</b>	<b>32</b>
<b>Bilaga 2</b>	<b>.....</b>	<b>36</b>
<b>Bilaga 3</b>	<b>.....</b>	<b>41</b>
<b>Bilaga 4</b>	<b>.....</b>	<b>44</b>
<b>Bilaga 5</b>	<b>.....</b>	<b>45</b>

# 1 Inledning

Iggesunds bruk är ett integrerat massa- och kartongbruk som tillverkar kemisk massa samt helblekt kartong (SBB). Kartongprodukten heter Invercote och är en flerskiktskartong som är lukt- och smakneutral och används till konsumentförpackningar inom bland annat kosmetik, parfym, choklad, sprit och elektronik (Iggesund Paperboard 2017).

Pappersmassan tillverkas genom att flis kokas i vitlut som löser upp träets lignin och friställer på så sett dess fibrer. Vitluten återvinns sedan i kemikalieåtervinningen. Till återvinningen av vitlut behövs bränd kalk,  $\text{CaO}$ . Den brända kalken återvinns i sin tur i kalkcykeln, genom att restprodukten mesa (som huvudsakligen består av kalciumkarbonat,  $\text{CaCO}_3$ ) spjälkas genom upphettning i en roterugn som kallas mesaugn.

Under det senaste året har ett flertal utredningar gjorts vid Iggesunds bruk kopplat till mesaugnen och kalkcykeln med målsättningen att höja den termiska verkningsgraden och tillgängligheten. Iggesunds bruk har framförallt velat arbeta vidare med två av förslagen: att höja mesaugnens tröskel och att blöda ut elfilterstoft. Detta arbete har därför fokuserat på att utreda potentialen kring dessa förslag.

## 1.1 Syfte, mål och frågeställningar

Projektets syfte är att undersöka den tekniska och ekonomiska potentialen att minska mesaugnens energianvändning genom de två förslagen: att utblöda elfilterstoft från mesaugnen och att höja mesaugnens tröskel.

Målet är att klarlägga huruvida det är ekonomiskt lönsamt att blöda ut elfilterstoft, samt ge en rekommendation till en optimal tröskelhöjd i mesaugnen.

Frågeställningarna som behandlas är följande:

- Vilken är den optimala mängden elfilterstoft att blöda ut med avseende på driftsekonomi?
- Vilket system är lämpligt för utblödning av elfilterstoft och vad är investeringskostnaden?
- Är det möjligt att pH-justera restsyra med elfilterstoft?
- Vilken tröskelhöjd i mesaugnen är optimal med avseende på den specifika energianvändningen?

## 1.2 Genomförande och avgränsningar

Under arbetets gång har en omvärldsanalys bestående av kartläggning av mesaugnar i andra svenska bruk och kontakter med konsult och leverantör utförts. Beräkningsmodeller för mesaugnen och för utblödningen av elfilterstoft har konstruerats i MATLAB, provtagningar har utförts på elfilterstoft och ett experiment att använda elfilterstoft till pH-justering av restsyra har utförts.

## 2 Bakgrund

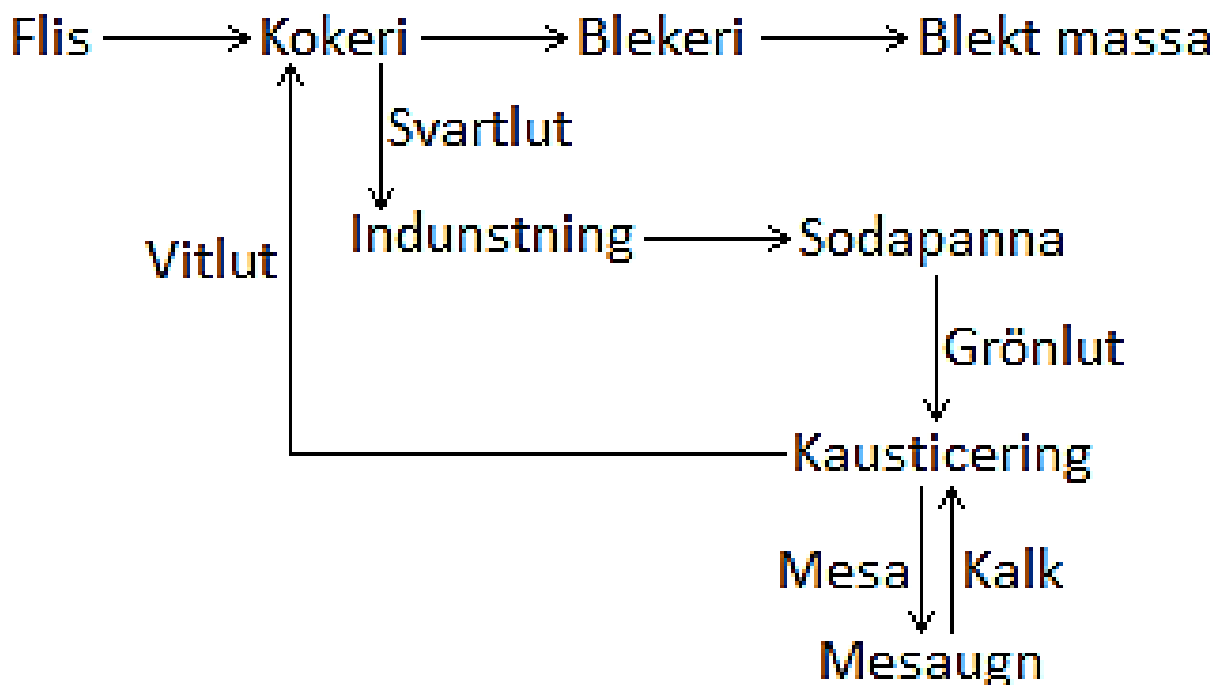
### 2.1 Pappersmassa

Det finns två typer av pappersmassa: mekanisk och kemisk massa. Vid tillverkningen av mekanisk pappersmassa frigörs fibrerna på mekanisk väg vilket är energiintensivt. Mekanisk massa ger ett svagare papper och eftersom ligninet inte avlägsnas så gulnar det med tiden, men har fördelen att en större andel av veden kan utnyttjas.

Kemisk massa framställs genom att kemikalier löser ut ligninet och på så sätt friläggs fibrerna. Kemisk massa ger ett starkare papper som kan blekas till hög ljushet och den andel av veden som inte används till att framställa massa, i huvudsak lignin, utnyttjas genom att omvandla dess energi till värme. Ett kemiskt massabruk är tack vare det i stort sett självförsörjande på energi. (Jirvall 1995)

#### 2.1.1 Sulfatmassa

Iggesunds bruk tillverkar kemisk massa av typen sulfatmassa. I sulfatmassaprocessen kokas flis i vitlut som innehåller de verksamma beståndsdelarna natriumhydroxid (NaOH) och natriumsulfid ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) (Borg 1993). Under kokningen löses träets lignin ut i lutvätskan och fibrerna friläggs. Massan tvättas sedan från lutvätska och går till efterbehandlingssteg som silning, blekning och slutligen tillverkning av kartong. En schematisk skiss över sulfatmassafabriken visas i figur 1.



Figur 1: En schematisk skiss över sulfatmassatillverkningen och dess kemikalieåtervinning.

#### 2.1.2 Sulfatmassafabriken kemikalieåtervinning

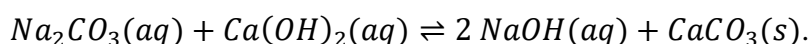
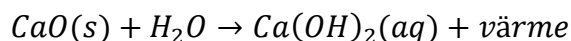
Lutvätskan som efter kokningen kallas svartlut, återvinns till vitlut genom processtegen indunstning, förbränning i sodapannan och kausticering.

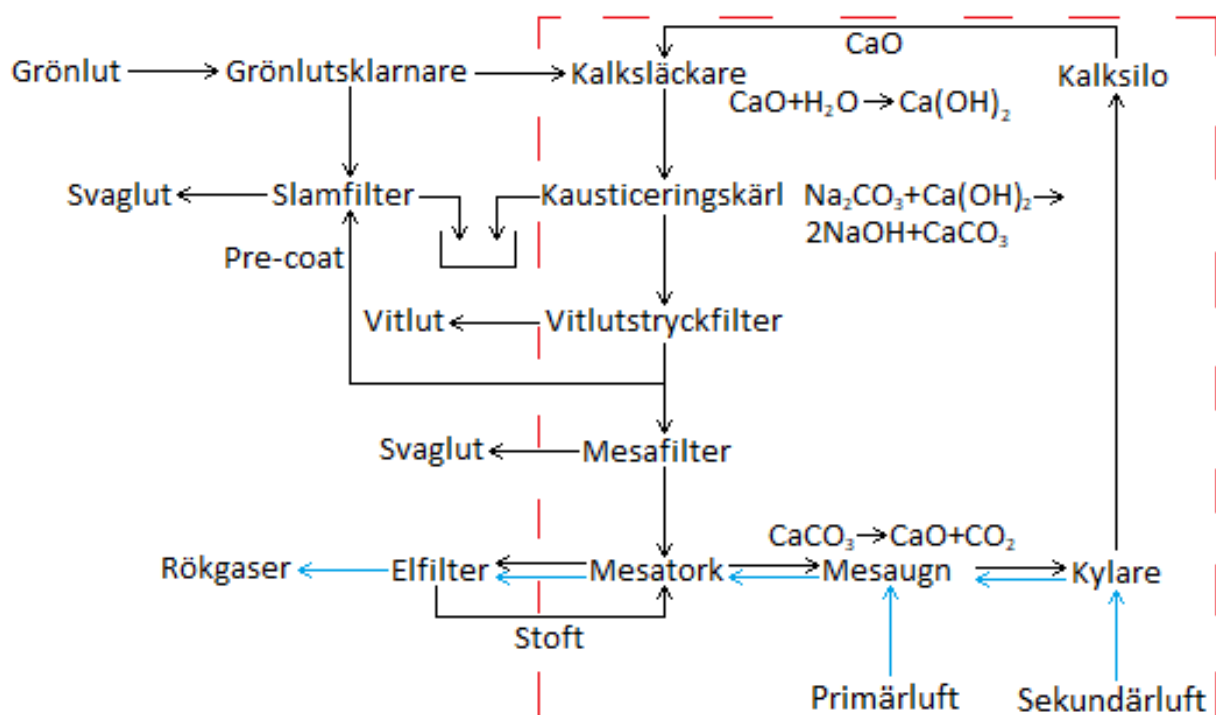
I indunstningen koncentreras lutvätskan genom att vätska förångas i flera värmeväxlare, och den förtjockas på så sätt från en torrhalt (viktprocent) på ungefär 15 % till en torrhalt på ungefär 75 %. Efter detta separeras råtallolja från processen som skickas iväg till ett externt företag för tillverkning av biodiesel. En restprodukt från tillverkningen av biodiesel är beckolja som huvudsakligen består av neutralämnen som till exempel högre alkoholer och estrar (Tall Oil Community u.å.), och används bland annat som bränsle i Iggesunds bruks mesaugn.

Lutvätskan sprutas sedan in i sodapannan där de organiska substanserna förbränns, vilket gör att värme bildas som används till att framställa processånga. I botten av sodapannan bildas en smälta av huvudsakligen natriumkarbonat,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (soda) och natriumsulfid,  $\text{Na}_2\text{S}$  (Borg 1993). Denna smälta rinner ur ugnen ned i smältalösaren där den blandas med svaglut (lågkoncentrerad vitlut) och lösningen kallas därefter, på grund av sin färg, för grönlut. Grönluten från smältalösaren innehåller uppslammade partiklar och renas därför genom att sedimenteras i en grönlutsutklarnare, där sedimentet går till slamfiltret där det tvättas för att sedan deponeras.

#### **2.1.2.1 Kalkcykeln**

Ett flödesschema över kalkcykeln kan ses i figur 2. Från smältalösaren går den renade grönluten till kalkcykeln och kalksläckaren där bränd kalk,  $\text{CaO}$ , tillsätts. Den brända kalken reagerar med vattnet i luten och bildar kalciumhydroxid,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , även kallad släckt kalk, i en starkt exotermisk reaktion. Lösningen går sedan till seriekopplade kausticeringskärl där natriumkarbonat reagerar med kalciumhydroxid och bildar natriumhydroxid och kalciumkarbonat i en reaktion som kallas kausticering. Kausticeringen är svagt endotermisk (Borg 1993). De kemiska reaktionerna i släckaren och kausticeringskärlen är följande:



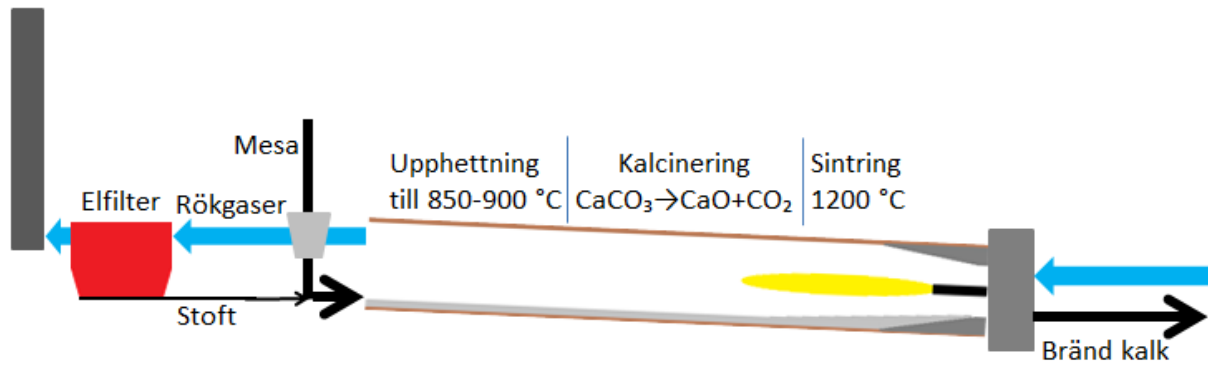


**Figur 2: Flödesschema över en del av kemikalieåtervinningen där cykeln inom den röda streckade markeringen kallas kalkcykeln. Svarta pilar visar materialflöden och blå pilar visar luft-/gasflöden.**

I och med bildningen av natriumhydroxid har vitlutens beståndsdelar återbildats. Vitluten tas ut genom tryckskivfilter som kallas PDW-filter för att kunna användas i massatillverkningen. Filtret består av roterande filterelement i ett tryckkärl med övertryck och vitluten trycks på så sätt genom filterdukarna, samtidigt som mesan som huvudsakligen består av kalciumkarbonat, fastnar på filtret och skrapas av (Borg 1993).

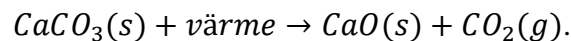
Mesa tas stötvis ut för att användas som precoat (ett yttre skikt) på slamfiltret medan huvudflödet går till sluttvättning och förtjockning vid mesafiltret. Mesafiltret är ett skivfilter med samma grundkonstruktion som PDW-filtret, men med vacuum som suger fast mesan på de roterande filterdukarna, för att sedan skrapas av. Mesans har efter det en torrhalt på ungefär 80 % (Borg 1993). Det som går igenom filtret är svaglut som går till smältalösaren. Mesan matas efter det in i en tork, där varm luft från mesaugnen blåser upp mesan till en cyklon, där den separeras från luftströmmen och slutligen åker in i mesaugnen.

### 2.1.2.1.1 Mesaugnen



Figur 3: Förenklad illustration av mesaugnen och dess elfilter.

Mesaugnen består av ett långt, svagt lutande och roterande ugnsrör, med en oljebrännare i utmatningsänden och som tillför värme genom strålning. Röret består av en yttre metallmantel med isolerande tegel på insidan och med en tröskel vid utloppsänden. Teglet skyddar plåtmanteln mot överhettning och minskar värmeförlusterna och tröskeln ökar uppehållstiden i den varma delen av ugnen. I mesaugnen torkas mesan och värms upp till 850–900 °C. Vid den temperaturen spjälkas kalciumkarbonat till kalciumoxid och koldioxid (Borg 1993) enligt följande reaktion:



Kalken värms sedan upp ytterligare till cirka 1 200 °C för att den ska sintra till en lämplig nodulstorlek. Noduliseringen minskar damningen i ugnen, vilket bland annat ger en bättre energieffektivitet eftersom dammet skärmar av strålning från lågan. Rökgaserna från mesaugnen innehåller mycket stoft och kan innehålla 3–30 % av den inmatade torra mesan (Borg 1993). Rökgasen renas genom att först gå igenom en cyklon och sedan genom fyra seriekopplade kamrar med elektrostatiske stoftavskiljare, elfilter, innan den går ut genom skorstenen. Det avskilda stoftet går in i mesaugnen tillsammans med mesan.

Efter ugnen kyls kalken ner i en kylare där sekundärluften till förbränningen samtidigt förvärms. Den brända kalken (CaO) går slutligen till en lagringssilo för att kunna användas i släckaren och kalkcykeln har med det slutits.

## 2.2 Restsyra

Till att bleka sulfatmassan används bland annat klordioxid. Klordioxiden framställs på fabriken och som restprodukt bildas en sur lösning som kallas restsyra (Jirvall 1995). Restsyran består huvudsakligen av svavelsyra ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Delar av den används inom fabriken men resterande mängd pH-justeras med inköpt natriumhydroxid för att sedan släppas ut i brukets avloppssystem.



## 3 Teori

### 3.1 Tröskelhöjd

Tröskeln är en uppdämning som ger en ökad uppehållstid i ugnen, men en högre tröskel befarades medföra nackdelar som bland annat en ökad damning. I följande avsnitt beskrivs mesaugnens kemi, geometri och energiflöde för att kunna besvara frågeställningen ”Vilken tröskelhöjd i mesaugnen är optimal med avseende på den specifika energianvändningen?”.

#### 3.1.1 Kemisk reaktion

För att avgöra vid vilken temperatur som en kemisk reaktion sker spontant, beräknas entalpi och entropi. Entalpi,  $H$ , kan beskrivas som

$$H = U + PV \quad (1)$$

där  $U$  är inre energin,  $P$  är trycket och  $V$  är systemets volym. För ett fast ämne är förändringen i tryck eller volym försumbart liten så entalpiförändringen består huvudsakligen av förändringen av inre energi (Atkins & Jones 2010).

Entropi,  $S$ , kan lite förenklat beskrivas som oordning, där hög entropi innebär en större oordning, och energi och materia tenderar att skingras i ökad oordning. Entropin i ett isolerat system ökar därmed vid en spontan reaktion. En förändring av entropin kan beräknas enligt

$$\Delta S = \frac{Q_{rev}}{T} \quad (2)$$

där  $Q$  är överförd energi i form av värme och  $T$  är temperaturen.

För att inte behöva beräkna entropin hos reaktionen och dess omgivning för att avgöra om en reaktion sker spontant, kan en förenkling utnyttjas genom att istället beräkna förändringen i Gibbs fria energi,  $G$ . Reaktionen är spontan om och endast om förändringen i Gibbs fria energi är negativ (Atkins & Jones 2010). Vid konstant temperatur är förändringen av Gibbs fria energi

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3)$$

För att bestämma vid vilken temperatur som reaktionen sker spontant kan ekvation 3 användas i följande samband:

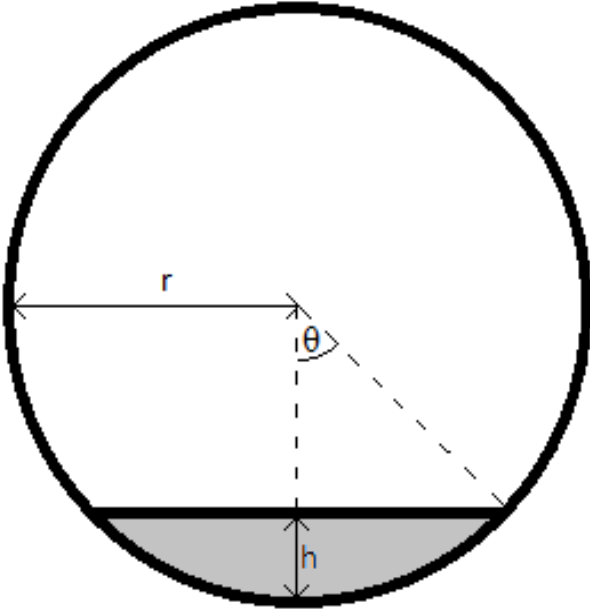
$$\Delta G < 0 \leftrightarrow T > \frac{\Delta H}{\Delta S} \quad (4)$$

#### 3.1.2 Volym

Mesaugnen har formen av en cylinder med radien  $r$  och mesans/kalkens tvärsnittsarea antas vara i form av ett segment med höjden  $h$ , se figur 4.

Mesaugnens tvärsnittsarea är  $\pi r^2$  och sektorn med vinkeln  $2\theta$  har arean

$$A_{sektor} = \frac{2\theta}{2\pi} \pi r^2 = \theta r^2. \quad (5)$$



Figur 4: Illustration av ett tvärsnitt i mesaugnen.

Segmentet med vinkeln  $\theta$  (gråmarkerat område i figur 4) har arean

$$A_{mesa} = A_{sektor} - 2 \cdot \frac{(r \cos(\theta) \cdot r \sin(\theta))}{2} = r^2(\theta - \cos(\theta) \sin(\theta)). \quad (6)$$

Mesans/kalkens höjd,  $h$ , kan skrivas som

$$h = r - r \cos(\theta) \leftrightarrow \theta = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h}{r} \right). \quad (7)$$

Utifrån ekvation 6 och 7 kan segmentets area skrivas som:

$$\begin{aligned} A_{mesa} &= r^2 \left( \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h}{r} \right) - \cos \left( \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h}{r} \right) \right) \sin \left( \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h}{r} \right) \right) \right) = \\ &= r^2 \left( \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h}{r} \right) - \left( 1 - \frac{h}{r} \right) \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{h}{r} \right)^2} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

### 3.1.3 Yta

Mesans omkrets mot röret och luften i tvärsnittet som ses i figur 4 (runt det gråmarkerade området) är

$$O = 2 \left( 2r\pi \frac{\theta}{2\pi} + r \sin(\theta) \right) = 2r(\theta + \sin(\theta)). \quad (9)$$

Ekvation 7 och 9 ger

$$O = 2r \left( \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h}{r} \right) + \sin \left( \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h}{r} \right) \right) \right) = 2r \left( \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h}{r} \right) + \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{h}{r} \right)^2} \right). \quad (10)$$

### 3.1.4 Uppehållstid

Vid utloppssänden finns en tröskel för att öka uppehållstiden i brännzonen. Enligt Borg (1993) bör uppehållstiden i brännzonen vara minst 2 timmar för att ge en god bränsleekonomi. Tröskelhöjden bestäms utifrån ugnens lutning, varvtal och önskad uppehållstid.

### 3.1.5 Temperaturförändring

Värmeöverföring sker på grund av en temperaturskillnad och kan ske på tre sätt: ledning, konvektion och strålning. I mesaugnen sker överföringen på alla tre sätten. I den varmaste delen dominerar strålning, och i de kallare delarna dominerar konvektion (Borg 1993).

Vid värmeledning beräknas värmeflödet  $P_l$  (W) enligt

$$P_l = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad (11)$$

där  $\lambda$  är värmekonduktiviteten (W/(m·K)),  $\delta$  är vägg tjockleken (m),  $A$  är väggytans area (m<sup>2</sup>) samt  $T_1$  och  $T_2$  är temperaturen (K) på respektive sida av väggen (Alvarez 2006).

Vid konvektion beräknas värmeflödet  $P_k$  (W) enligt

$$P_k = \alpha \cdot A \cdot (T_v - T_f) \quad (12)$$

där  $\alpha$  är värmeövergångskoefficienten (W/m<sup>2</sup>·K),  $A$  är väggytans area (m<sup>2</sup>),  $T_v$  är väggens temperatur (K) och  $T_f$  är fluidens temperatur (K) (Alvarez 2006).

Vid strålning beräknas värmeeffekten  $P_s$  (W) enligt

$$\frac{P_s}{A} = \epsilon \cdot C_s \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (13)$$

där  $A$  är strålningsytan (m<sup>2</sup>),  $\epsilon$  är emissionsförhållandet,  $C_s$  är svarta kroppens strålningskonstant (W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)) och  $T$  är strålningskroppens temperatur (Alvarez 2006).

Den specifika värmekapaciteten är den värmemängd som måste tillföras för att öka ämnets temperatur med en grad. Den är inte konstant utan en funktion av temperaturen men i många praktiska fall kan man anta att den är konstant inom ett intervall (Alvarez 2006). Det finns två typer av specifik värmekapacitet:  $c_p$  vid konstant tryck och  $c_v$  vid konstant volym.

Temperaturförändringen ( $dT$ ) vid konstant tryck beräknas enligt:

$$dT = \frac{dQ}{m \cdot c_p} \quad (14)$$

där  $dQ$  är tillförd värme och  $m$  är massan.

## 3.2 Utblödning av elfilterstoft

I kalkcykeln sker en anrikning av inerta ämnen. Dessa värms upp och torkas varje cykel i mesaugnen och ökar därmed den specifika energianvändningen. Vid en utblödning av elfilterstoft skulle mängden inerta ämnen som anrikas i kalkcykeln kunna minskas, men man förlorar även kalk som därmed behöver köpas in för att ersättas. I följande avsnitt beskrivs elfilter, fosfor i kalkcykeln, volymen förbränningsgas samt elfilterstoftets löslighet i syra.

Detta för att kunna besvara de tre frågeställningarna: ”Vilken är den optimala mängden elfilterstoft att blöda ut med avseende på driftsekonomi?”, ”Vilket system är lämpligt för utblödning av elfilterstoft och vad är investeringskostnaden?” och ”Är det möjligt att pH-justera restsyra med elfilterstoft?”.

### 3.2.1 Elektrostatiska stoftavskiljare

Elektrostatiska stoftavskiljare, elfilter, består av negativt laddade emissionselektroder, som är fastspända trådar samt utfällningselektroder, i form av plåtridåer, kopplade till skyddsjord. Fältstyrkan nära emissionselektroderna är så stor att gasen joniseras. De positiva jonerna dras till emissionselektroderna och blir snabbt utsorterade. De negativa jonerna behöver färdas genom hela elektrod mellanrummet för att nå en utfällningselektrod och på vägen kolliderar de med och fastnar på neutrala gasmolekyler och nya negativa joner uppstår. Dessa negativa joner fastnar på stoftpartiklar och får dem att röra sig till utfällningselektroderna. Där laddas gasmolekylerna ur och strömmar vidare, samtidigt som stoftpartiklarna fastnar på utfällningselektroden. Stoftet avlägsnas från utfällningselektroden genom bankning (Alvarez 2006).

Elfilter har bra förmåga att avskilja även de minsta partiklarna och totalavskiljningsgrader på 99,5 % är vanliga (Alvarez 2006).

### 3.2.2 Fosfor i processen

I mesa/kalkcykeln sker en anrikning av processfrämmande ämnen. Fosfor (P) binder i processen till kalcium (Ca) och syre (O) och bildar trikalciumfosfat ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) vilket gör att varje viktprocent fosfor sänker halten fri CaO i den brända kalken med ungefär 5 viktprocent (Borg 1993). Viktandelen fosfor i trikalciumfosfat beräknas som:

$$M_P = 30,97 \frac{\text{g}}{\text{mol}}; M_{Ca} = 40,08 \frac{\text{g}}{\text{mol}}; M_O = 16,00 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{Viktandel fosfor} = \frac{2 \cdot M_P}{3 \cdot M_{Ca} + 2 \cdot M_P + 8 \cdot M_O} = 0,1997 \quad (15)$$

### 3.2.3 Fosforbalans

Till kalkcykeln finns ett naturligt inflöde av fosfor med grönluten till kalksläckaren. Det utflöde som finns är huvudsakligen fosforinnehållet i utblödningen av mesa som sker efter vitlutsfiltret och som används som precoatning av slamfiltret. Utblödningen görs stötvis med ett intervall på ungefär 7 timmar. Förhållandet mellan mesa, kalk och stoft antas vara konstant.

Vid jämvikt är inflödet ( $\dot{m}_{P,in}$ ) lika med utflödet ( $\dot{m}_{P,ut}$ ). Detta innebär att

$$\dot{m}_{P,in} = \dot{m}_{P,ut} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{P,ut} = \dot{m}_{precoat} \cdot c_{mesa} + \dot{m}_{utblödning} \cdot c_{stoft} \quad (17)$$

$$c_{stoft} = c_{mesa} \cdot x \quad (18)$$

Om ekvation 17 och 18 sätts in i ekvation 16 fås:

$$\dot{m}_{P,in} = c_{mesa} \cdot (\dot{m}_{precoat} + \dot{m}_{utblodning} \cdot x) \quad (19)$$

$$c_{mesa} = \frac{\dot{m}_{P,in}}{\dot{m}_{precoat} + \dot{m}_{utblodning} \cdot x} \quad (20)$$

där  $\dot{m}_{P,in}$  och  $\dot{m}_{P,ut}$  är in respektive utflödet av fosfor,  $\dot{m}_{precoat}$  är det genomsnittliga massflödet av precoat,  $\dot{m}_{utblodning}$  är utblödningens massflöde,  $c_{mesa}$  och  $c_{stoff}$  är fosforhalten i mesan och utblödningsstoffet och  $x$  är förhållandet mellan mesans och stoftets fosforhalt.

### 3.2.4 Volym förbränningsgas

Förbränning är en kemisk reaktion där bränsle oxideras och energi frigörs. Tallolja består huvudsakligen av grundämnena kol, väte och syre. På mol eller volymbasis innehåller luft ungefär 21 % syre och 79 % kväve, vilket innebär att på varje mol syre ( $O_2$ ) i luften går det ungefär 4,76 mol kväve ( $N_2$ ). Vid förbränning kan kvävet i princip betraktas som inert (Cengel & Boles 2011). Förbränningsprodukterna vid fullständig förbränning är koldioxid ( $CO_2$ ) och vatten ( $H_2O$ ). Den teoretiska luftmängden ( $L$ ) som behövs för fullständig förbränning kan beräknas enligt:

$$L = \frac{4,76}{100} \cdot \left( \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) \text{ kmol/kg bränsle} \quad (21)$$

där  $c$ ,  $h$ ,  $s$  och  $o$  är bränslets viktsprocentliga andelar av respektive grundämne (Alvarez 2006).

Det behövs även ett visst luftöverskott för att minimera ofullständig förbränning och normalt behöver syreöverskottet i utgående rökgas vara cirka 1 % syre (Borg).

Volymen ( $V$ ) av en gas beräknas

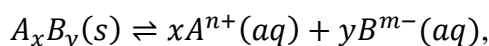
$$V = \frac{ZNR_uT}{P} \text{ (m}^3\text{)} \quad (22)$$

där  $Z$  är kompressibilitetsfaktorn,  $N$  är substansmängden (mol),  $R_u$  är allmänna gaskonstanten,  $T$  är temperaturen (K) och  $P$  är trycket (kPa). För ideala gaser är kompressibilitetsfaktorn 1.

När ideala gaser blandas påverkas normalt sett inte molekylerna av varandra och är det en icke-reaktiv blandning av ideala gaser så beter den sig som en ideal gas. Detta är exempelvis fallet för luft som är en blandning av de ideala gaserna kväve och syre (Cengel & Boles 2011).

### 3.2.5 Kalciumkarbonat löslighet

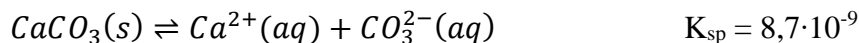
Lösligheten för ett fast lösningsmedel, exempelvis ett salt, som löses i vatten beskrivs med en jämviktskonstant som heter löslighetsproduktkonstant  $K_{sp}$ . Storleken på  $K_{sp}$  visar hur mycket av det fasta lösningsmedlet som kan lösas till joner i lösningen och ett lösningsmedel som är svårslösligt har ett lågt  $K_{sp}$  och vice versa. När ett salt med den generella formeln  $A_xB_y$  löses enligt



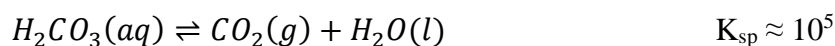
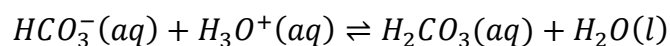
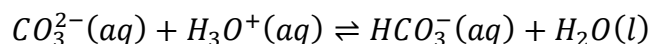
blir det generella  $K_{sp}$ :

$$K_{sp} = [A^{n+}]^x + [B^{m-}]^y.$$

Kalciumkarbonat är ett metallsalt som har låg löslighet i rent vatten.



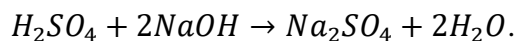
Om en syra tillsätts så tillsätts även hydroniumjoner som i sin tur reagerar med karbonatjoner vilket resulterar i följande tre högerförskjutna reaktioner (Moore, Stanitski & Jurs 2011):



När koldioxiden frigörs förskjuts reaktionerna åt höger och mer kalciumkarbonat kan lösas upp.

### 3.2.5.1 Restsyra

Restsyra består huvudsakligen av  $H_2SO_4$ . När den pH-justeras med NaOH bildas saltet natriumsulfat ( $Na_2SO_4$ ) och vatten enligt följande reaktion:



## **4 Metod**

Projektet har innefattat flertalet aktiviteter där några är gemensamma för båda de utredda förslagen: att höja mesaugnens tröskel och att blöda ut elfilterstoft, medan andra är specifika för det ena eller det andra förslaget.

### **4.1 Omvärldsanalys**

En omvärldsanalys har utförts för att utreda båda förslagen genom en kartläggning av andra svenska sulfatmassabruk samt kontakter med en konsult och ugnslieferantören och beskrivs nedan under respektive avsnitt.

#### **4.1.1 Kartläggning av andra bruk**

Till kartläggningen har 18 svenska sulfatmassabruk utsetts som lämpliga referensobjekt eftersom de använder samma typ av tillverkningsprocess som Iggesunds bruk.

#### **4.1.2 Kontakter med konsult och leverantör**

För att få ett bättre underlag för bedömning av konsekvenser vid en höjning av tröskel har kontakt haft med både en konsult samt med Valmet som är tillverkare av Iggesunds mesaugn. Två halvdagarsmöten har haft med konsulten: ett tidigt i projektet för att främst få en bättre förståelse av problemställningen, och ett senare för att försöka rätta ut frågetecken som uppkommit. Med konsulten har även kontakt hållits under projektets gång.

I slutet av projektet har ugnslieferantören träffats för ett heldagsmöte på deras kontor i Köpenhamn. Syftet med mötet var främst att höra deras synpunkter angående förslagen som har utretts. Närvarande på mötet var fyra ingenjörer från deras process- och designavdelningar.

## **4.2 Tröskelhöjd**

### **4.2.1 Mätning av tröskelhöjd**

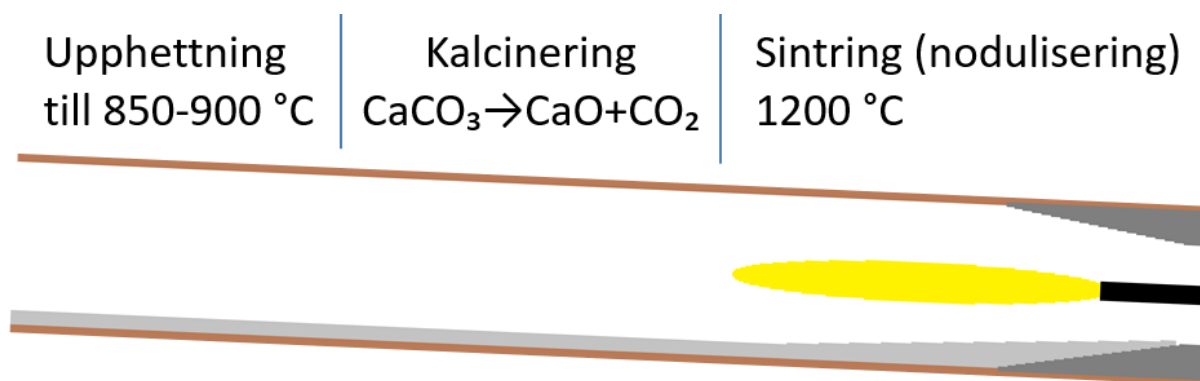
Den ursprungliga tröskelhöjden har avlästs från konstruktionsritningar. Det fanns dock tvivel på att tröskelhöjden fortfarande är densamma som dess originalhöjd, och för att utreda det har ett externt företag gjort en mätning av tröskelns innerdiameter där tröskeln var som mest nednött. Mätningen utfördes under ett underhållsstopp av mesaugnen.

### **4.2.2 Beräkningsmodell**

För att bedöma hur den specifika energianvändningen ändras med en höjd tröskel har en beräkningsmodell av mesaugnen konstruerats i MATLAB och kan ses i bilaga 1.

#### **4.2.2.1 Modellens uppbyggnad**

Modellen beräknar mesans/kalkens temperatur genom ugnen i sekundsteg, från att mesan går in i ugnen tills kalken går förbi tröskeln och ut från ugnen. I modellen delas ugnen in i tre faser: uppvärmnings-, förbrännings- samt sintringsfasen och illustreras i figur 5. I slutet av sintringsfasen sjunker temperaturen och därmed påbörjas en nedkylning av kalken.



**Figur 5: Illustration av indelningen av mesaugnen**

I modellen används mesans flödeshastighet, mesans höjd samt ugnens geometri för att beräkna mesans volym samt yta mot luft och ugnsrör under den första sekunden. Mesans ytemperatur har uppskattats utifrån tidigare studier i Iggesund (se bilaga 5) och beskrivs med hjälp av ett polynom. Värmeeffekten på mesan/kalken i hela ugnen beräknas som konvektion (ekvation 12). Denna förenklingen har gjorts eftersom strålningseffekten är svår att bestämma och beror bland annat på hur mycket strålning som dammet runt lågan skärmar av.

Under uppvärmningsfasen beräknas temperaturförändringen med sekundupplösning med ekvation 14 och upprepas tills temperaturen 900 °C har nåtts, varefter modellen går över till förbränningsfasen.

Under förbränningsfasen sker kalcineringen och värmeenergin används till att spjälka  $\text{CaCO}_3$  till  $\text{CaO}$  och  $\text{CO}_2$ . Detta leder även till att volymflödet minskar, vilket det tas hänsyn till för att sedan räkna ut mesans/kalkens yta och volym inom den simulerade sekunden. När halten kalciumoxid har uppnått 90 % går modellen in i sintringsfasen.

Under sintringsfasen beräknas temperaturen på samma sätt som under uppvärmningsfasen.

Gashastigheten vid tröskeln och vid brännarrörets mynning samt mesans totala vikt beräknas eftersom det är intressanta aspekter att beakta vid en eventuell höjning av tröskeln.

#### **4.2.2.2 Kalibrering och användning av modell**

Modellens värmeöverföringskonstant, lägsta mesahöjd samt mesans/kalkens lutning jämfört med horisontalplanet från tröskeln har inledningsvis kalibrerats för att ge en uppehållstid och en temperaturkurva i ugnen som överensstämmer så bra som möjligt med vad tidigare studier i Iggesund har visat.

I modellen har tröskelhöjden sedan varierats och för vardera tröskelhöjd kalibreras en temperaturkonstant för att ge samma maximala temperatur hos kalken, och därmed få samma kalkkvalitet som med nuvarande tröskel. Utifrån detta har även en ny uppehållstid i ugnen beräknats. Den kalibrerade temperaturkonstanten antas i modellen motsvara energianvändningen, så om den exempelvis blir 0,9 efter kalibreringen är den beräknade energianvändningen 10 % lägre än med nuvarande tröskelhöjd.



## 4.3 Utblödning av elfilterstoft

### 4.3.1 Provtagningar av elfilterstoft

För att utreda andelen av framförallt fosfor i kalkcykeln, samt var fosforhalten är som högst, har prover tagits på kalk, mesa samt stoft. Mesaprovet togs efter mesafiltret, kalkprovet togs vid kalkkylaren, det ena stoftprovet togs vid slutet av kalktransportören precis innan det går in i ugnen, och det andra stoftprovet togs vid en spolningsventil under elfiltrets andra kammare. Proverna samlades in i plastburkar. För att få en bra bild över eventuella variationer av kemiskt innehåll samt för att minska osäkerheten gjordes provtagningar vid tre skilda tillfällen, den 14/2, den 18/2 och den 25/2. Proverna togs vid tillfällen när ingen köpkalk matades in eller hade matats in de senaste dagarna, det för att minska köpkalkens påverkan på proverna och för att få så likvärdiga förutsättningar som möjligt.

Proverna har sedan skickats till analys hos ett externt företag som analyserat dem på dess innehåll av kalciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), kalciumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), kalciumoxid ( $\text{CaO}$ ), fosfor (P) och natrium (Na).

### 4.3.2 Experiment att pH-justera restsyra

För att undersöka möjligheten att hitta ett användningsområde för elfilterstoftet vid en eventuell utblödning, har ett experiment för att pH-justera restsyra med elfilterstoft utförts. I experimentet gjordes ett försök med natriumhydroxid och tre försök med elfilterstoft.

Materiell som användes till försöken var en 600 ml glasbägare, en digital pH-mätare, ett stativ med hållare, ett 250 ml och ett 500 ml mätglas, en mindre plastbägare för tvätt av pH-mätare, en sprutflaska med avjoniserat vatten, en plastpinne och en digital mätpipett. Ämnen som användes var restsyra, natriumhydroxid samt elfilterstoft.

I försök 1 neutraliserades restsyra med natriumhydroxid genom att 200 ml restsyra mättes upp i mätglaset och hölls sedan till 600 ml bägaren där pH-värdet mättes. Efter det tillsattes först 20 ml natriumhydroxid, sedan 5 ml natriumhydroxid i taget och pH-värdet noterades efter varje dos. Försöket fortsatte tills pH-värdet översteg 7.

I försök 2–4 mättes på samma sätt 200 ml restsyra upp i mätglaset och hölls över till 600 ml bägaren där pH-värdet mättes. Sedan tillsattes 10 g elfilterstoft. I försök 2 och 3 användes magnetomrörare. Det var då svårt att få elfilterstoftet att lösa sig eftersom ett skum bildades och lyfte upp elfilterstoftet från vätskans yta vilket hindrade elfilterstoftet att blandas ned i restsyran. I ett försök att få det att lösa sig bättre utfördes försök 4 istället med manuell omrörning med en plastpinne, där omrörningen gjordes vid ytan med fokus på att försöka få bort skummet. Sedan tillsattes 5 g elfilterstoft i taget tills 180 g hade tillsatts och efter det tillsattes 10 g i taget. Vid tillfällen när lösningen bedömdes vara för torr för att kunna lösa upp ytterligare elfilterstoft, tillsattes 50 ml avjoniserat vatten. Efter varje dos elfilterstoft eller vatten avlästes lösningens pH-värde. Försöket fortsatte tills provets pH-värde översteg 7.

### 4.3.3 Beräkningar

#### 4.3.3.1 Allokering av energi

Beräkningar av mesaugnens energibalans har utförts i MATLAB, se bilaga 2, för att allokera tillförd energi till de tre kategorierna CaO, P, och övrigt.

Vid allokeringen av energin antas en torrhalt på 80%. Vattnet förångas helt, ämnet antas värmas upp till 1 200 °C och sedan kylas ner till 180 °C. Kalciumoxiden spjälkas dessutom till CaO och CO<sub>2</sub>. Inkommande gas antas ha temperaturen 0 °C och utgående gas temperaturen 300 °C. Den mängd energi som behövs i ugnen inklusive förångningen av vattnet, beräknas som det teoretiska energibehovet.

Skillnaden mellan det teoretiska energibehovet och den verkliga energianvändningen är förluster och allokeras till CaO, Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> och övrigt efter hur mycket energi som teoretiskt behövs för att värma upp respektive ämne till 1 200 °C inklusive förångning av mesans vatteninnehåll, men exklusive spjälkning av CaCO<sub>3</sub>.

På så sätt beräknas energimängden som behövs för att värma en viss mängd torrs substans av de tre kategorierna CaO, P och övrigt. Även energiförlusten för en viss mängd utblött elfilterstoft och beräknas som energimängden för att torka och värma upp CaCO<sub>3</sub> till 180 °C.

#### 4.3.3.2 Optimal mängd utblödning

En beräkningsmodell konstruerades i MATLAB, se bilaga 3, som beräknar halten av fosfor i kalken beroende på vilken mängd elfilterstoft som blöds ut. För att beräkna mesans fosforhalt används ekvation 20. Det nuvarande fosforinnehållet (utan utblödning) i mesa, kalk och stoft baseras på medelvärdet från de tre provtagningarna. Det antas att vid medelvärdet så är inflödet av fosfor lika stort som utflödet.

Energibesparingen beräknas som summan av energikostnaden och energiförlusterna (på grund av att stoftet som blöds ut har torkats). Den ekonomiska besparingen beräknas som summan av energikostnaden, kostnaden för ersättningskalk, deponeringskostnad och energiförlusterna och jämförs mellan när stoft blöds ut och när det inte blöds ut.

## 5 Resultat

### 5.1 Tröskelhöjd

#### 5.1.1 Spjälkningstemperatur

Spjälkningstemperaturen för reaktionen  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$  beräknas med ekvation 4.

$$\begin{aligned}\text{CaCO}_3 &\rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \\ \Delta S^\circ &= 92,9 - (39,75 + 213,74) = -160,59 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol}) \\ \Delta H^\circ &= -1\,206,92 - (-635,09 + (-393,509)) = -178,32 \text{ kJ/mol} \\ T &> \frac{\Delta H^\circ}{\Delta S^\circ} \Leftrightarrow T > 1\,110 \text{ K } (837^\circ \text{C})\end{aligned}$$

Entropier och entalpier kommer från appendix J i Moore, Stanitski & Jurs (2011). För att spjälkningen ska ske spontant behöver mesans temperatur överstiga  $837^\circ \text{C}$ .

#### 5.1.2 Mätning av tröskelhöjd

Den ursprungliga innerdiameteren på tröskeln var 2 530 mm, vilket ger att tröskelhöjden då var 61 cm från mantelplåten. Det motsvarar 16,3 % av mantelplåtens innerdiameter. Tröskeln visade sig vara ojämnt nednött och mätningen visade att innerdiameteren där den var som störst, och därmed mest nednött, är 2 680 mm. Det ger att tröskelhöjden från mantelplåten på mätstället är 53,5 cm som snitt på båda sidor vilket motsvarar 14,3 % av mantelplåtens innerdiameter. Tröskeln är därmed nednött med i genomsnitt 7,5 cm vid dess mest nednötta punkt. Figur 6 visar en bild på tröskeln från stoppet när mätningen utfördes.

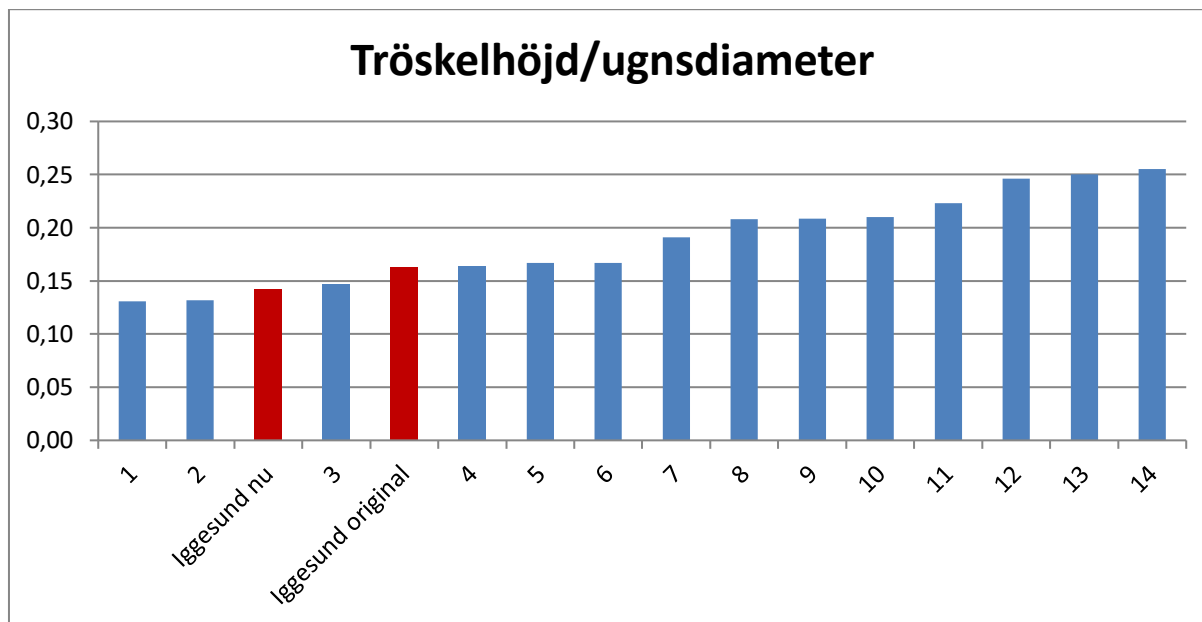


Figur 6: Bild på mesaugnen och dess tröskel på utloppssidan under ett stopp då brännaren var uttagen. I mitten ses ugsnröret och tröskeln är sista delen av röret hitåt sett på bilden.

I figur 6 kan det ses att tröskeln har nött ner olika mycket på olika ställen.

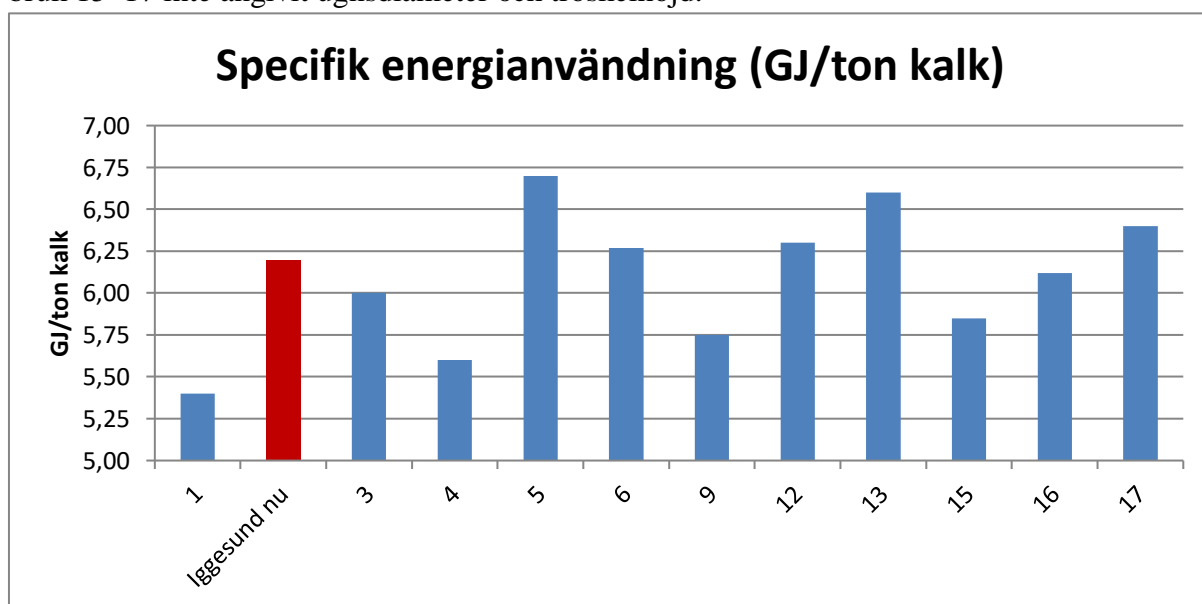
### 5.1.3 Andra bruk

I kartläggningen var det 14 av 18 bruk som svarade på båda frågorna om ugnsdiameter och tröskelhöjd. Svaren är redovisade i figur 7 där de benämns som fabrik 1–14 och Iggesunds nuvarande tröskelhöjd och originaltröskelhöjd, sorterade efter kvoten tröskelhöjd/ugnsdiameter.



Figur 7: Kvoten mellan tröskelhöjd över mantelplåten och ugnsdiameter i fabrikernas mesaugnar.

I figur 8 ses en jämförelse mellan de bruk som angav specifik energianvändning. Notera att bruk 15–17 inte angivit ugnsdiameter och tröskelhöjd.



Figur 8: Specifik energianvändning i mesaugnen

Observera att fabrik 1 som har angett den lägsta specifika energianvändningen så att de var osäkra på den siffran.

#### **5.1.4 Mängd sekundärluft**

Beckoljan som används i mesaugnen har följande huvudbeståndsdelar i viktprocent (Leppänen & Sahlin 2016):

- Kol, C: 79,6 %
- Väte, H: 11,1 %
- Syre, O: 9 %

Svavelinnehållet är mycket litet. Beckoljans effektiva värmevärde vid konstant tryck är 37,73 MJ/kg.

Med ekvation 21 beräknas den totala luftmängden som behövs för fullständig förbränning till 0,434 kmol/kg beckolja. Med ekvation 22 beräknas att luftens volym vid 900 K är 31 m<sup>3</sup>/kg beckolja och vid 1 200 K är den 41,3 m<sup>3</sup>/kg beckolja.

Detta ger att vid produktionen 13 ton kalk/h med den specifika energianvändningen 6,2 GJ/ton kalk och primärluftsflödet 3 400 m<sup>3</sup>/h blir sekundärluftsflödet vid 900 K och 1 200 K, 62 800 m<sup>3</sup>/h = 17,4 m<sup>3</sup>/s respektive 84 900 m<sup>3</sup>/h = 23,6 m<sup>3</sup>/s.

#### **5.1.5 Beräkningsmodell**

##### **5.1.5.1 Kalibrering**

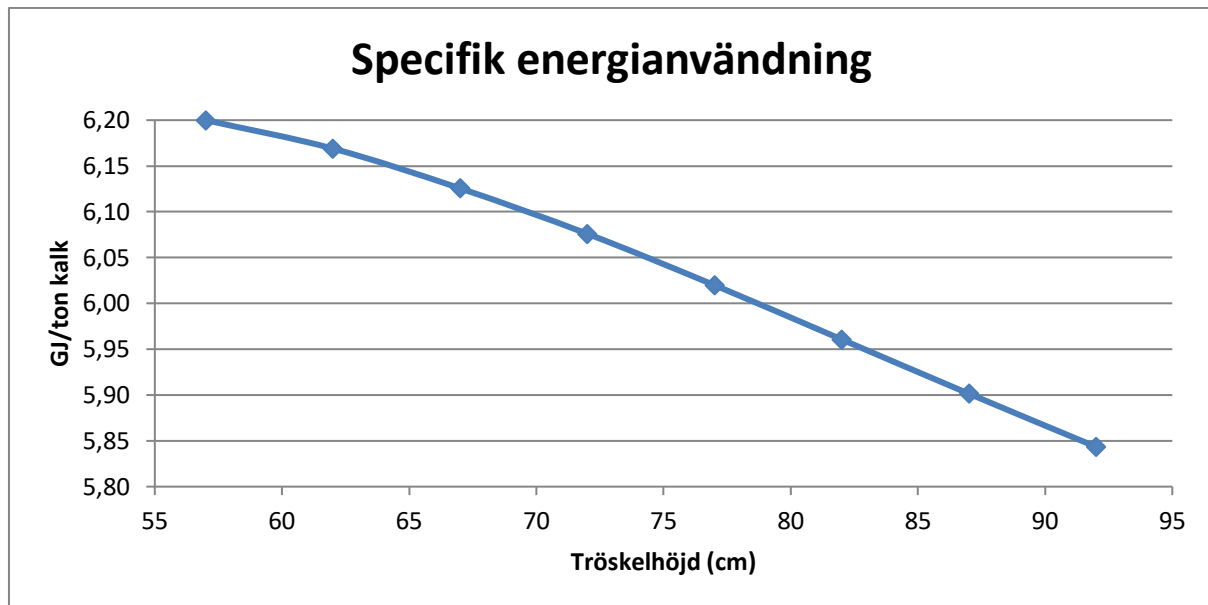
Vid kalibreringen av MATLAB-modellen som behandlar tröskelhöjden användes följande parametrar:

- Tröskelhöjd: 0,5725 m
- Lägsta mesadjup: 0,255 m
- Mesans lutning från tröskeln till horisontalplanet: 0,010 %
- Värmeöverföringskonstant: 181 W/(m<sup>2</sup>·K)

Tröskelhöjden som används i modellen är medelvärdet av den ursprungliga tröskelhöjden och den uppmätta tröskelhöjden på tröskeln mest nednötta ställe. Det lägsta mesadjupet, mesans lutning från tröskeln till horisontalplanet och värmeöverföringskonstanten har kalibrerats för att uppnå samma uppehållstid och maximala kalktemperatur som tidigare studier.

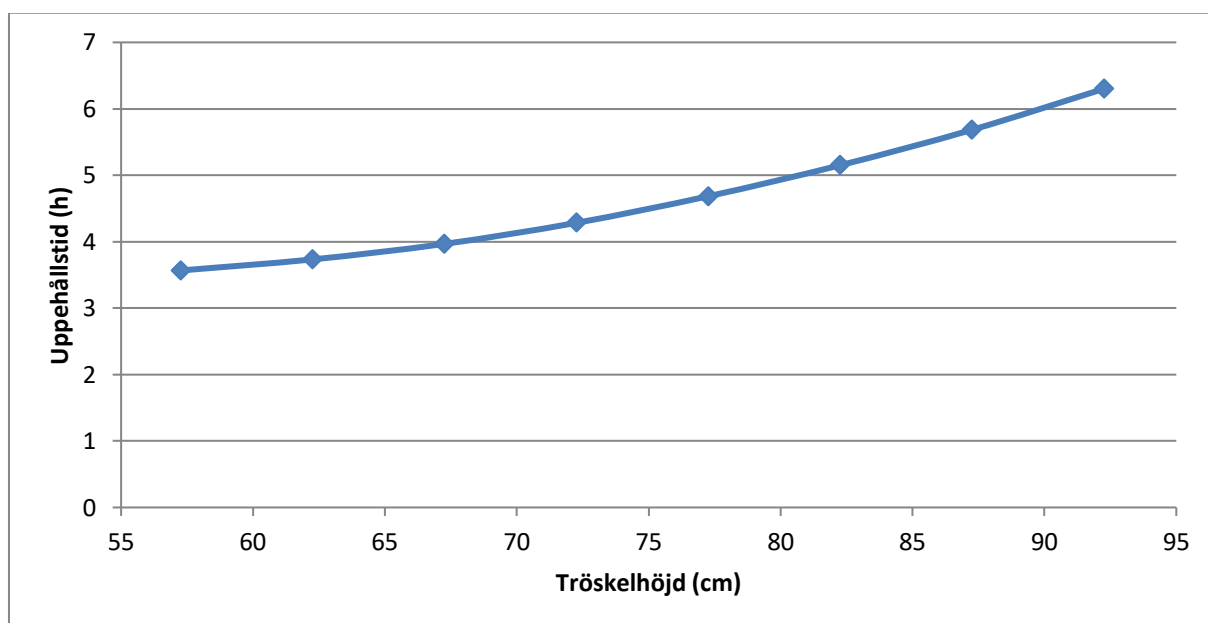
##### **5.1.5.2 Simulering**

Resultatet från simuleringen ses i figur 9, figur 10, figur 11 och figur 12.



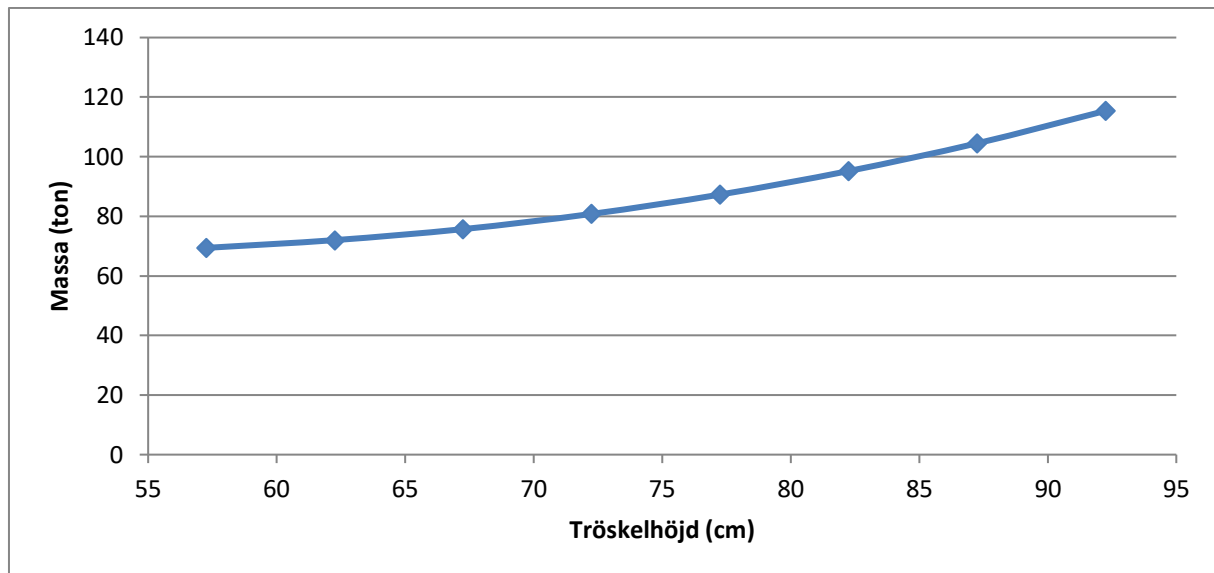
**Figur 9:** MATLAB-modellens beräknade specifika energianvändning beroende på tröskelhöjd.

MATLAB-modellens resultat visar att en högre tröskelhöjd ger en lägre specifik energianvändning.



**Figur 10:** MATLAB-modellens beräknade uppehållstid beroende på tröskelhöjd.

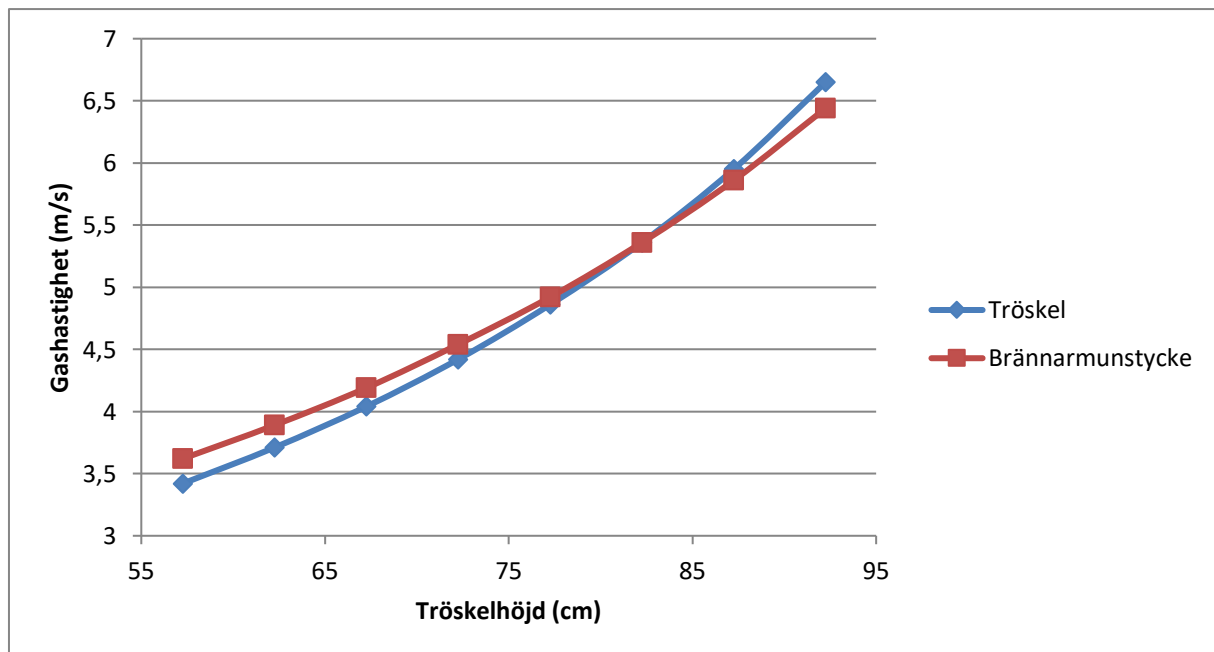
En högre tröskel leder till en längre uppehållstid när produktionen är på samma nivå.



Figur 11: MATLAB-modellens beräkning av mesans/kalkens totalvikt i ugnen beroende på tröskelhöjd.

Med en högre tröskel ökar även vikten på kalken/mesan i ugnen.

I figur 12 beräknas gashastigheten vid tröskeln och vid brännarmunstyckets mynning beroende på tröskelhöjd. Temperaturen antas vara 900 K vid tröskeln och 1 200 K vid brännarmunstyckets mynning.



Figur 12: Beräknad gashastighet vid tröskeln och vid brännarmunstyckets mynning beroende på tröskelhöjd.

### 5.1.6 Kontakt med konsult och leverantör

En högre tröskel skulle öka tyngden på de bärande komponenterna. Viktökningen kommer både från en större tröskel som väger mer, samt av uppdämningen av material i ugnen. Ugnsleverantören rekommenderar av den anledningen inte att höja tröskeln till 93 cm eftersom vikten då skulle göra att belastningen blir något högre än vad komponenterna är

specificerade att klara. Det skulle riskera att öka mesaugnens underhållskostnad eftersom komponenterna riskerar att slitas ut i förtid.

En högre tröskel skulle även ge en högre hastighet på sekundärluften och därmed förändra förbränningsbetingelserna. Enligt konsulten går det att hantera om brännaren justeras för de nya betingelserna. Han menar på att det viktiga är att förhållandet mellan sekundärluft, primärluft och bränslets hastighet hålls konstant. Det skulle göra att luftens moment in mot lågan är oförändrat, och därmed hålls lågan stabil.

En annan farhåga som har funnits är att eftersom en högre tröskel leder till en ökad gashastighet på sekundärluften vid tröskeln så skulle det även kunna leda till en ökad damning. Det skulle leda till att värmeöverföringen skulle minska från lågan till bädden. Detta har tagits upp med konsulten och han menar att dammet runt lågan i första hand kommer från kylaren. Där kommer gashastigheten inte att förändras vid en höjning av tröskeln.

Ytterligare en fördel med en högre tröskel är att ugnens maximala kapacitet skulle öka. Nackdelen med att köra öka produktionen är att det skulle ske på bekostnad av ökningen av ugnens energieffektivitet.

Konsultens bedömning av kostnaden för att höja mesaugnens tröskel är att den skulle bli ungefär 700 000 – 800 000 SEK.

## 5.2 Utblödning av elfilterstoft

### 5.2.1 Provtagning

Medelvärdena från den kemiska analysen av torrsubstansen i proverna från provtagningen ses i tabell 1. För värden från samtliga provtagningar, se bilaga 4.

Tabell 1: Medelvärden från grundämnesanalysen vid de fyra provtagningsuttagen. Stoftuttaget precis innan ugnen benämns ”1 Stoft” och uttaget under elfiltret benämns ”2 Stoft”.

Provuttag	P	Na	CaCO <sub>3</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaO
Kalk	1,23 %	1,68 %			
Mesa	0,93 %	1,03 %	88,37 %	3,43 %	3,25 %
1 Stoft	1,78 %	1,77 %	83,80 %	4,00 %	0,93 %
2 Stoft	2,22 %	2,70 %	76,47 %	3,03 %	1,77 %

Resultatet visar att koncentrationen av fosfor är som högst vid provtagningsuttaget ”2 Stoft” som är placerat under elfiltret. Innehållet av kalciumoxid CaO i kalken görs det regelbundna mätningar på och den ligger på ungefär 90 %.

### 5.2.2 Beräkningar

#### 5.2.2.1 Allokering av energi

Allokeringen av energin beräknades i MATLAB, se bilaga 2. En viktprocentenhet av respektive ämne i ett ton kalk beräknas använda följande energimängd, inklusive energiförluster:

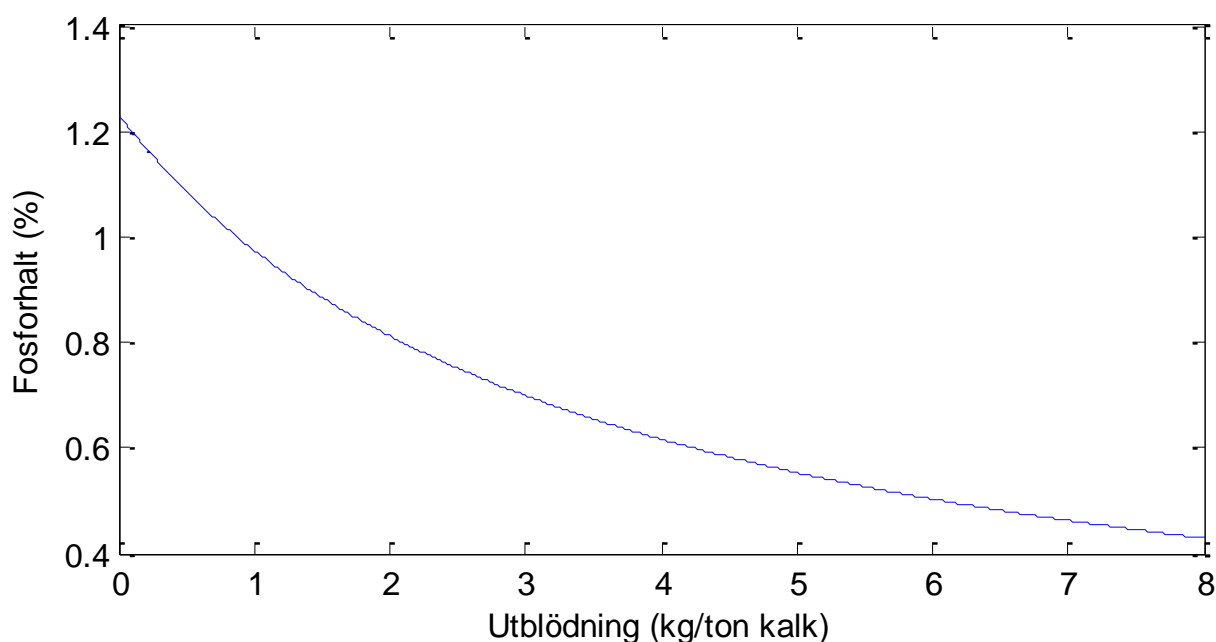


- Fosfor, P: 92,7 MJ
- Kalciumoxid, CaO: 66,8 MJ
- Övrigt: 19,3 MJ

Observera att varje procentenhet fosfor binder motsvarande cirka 5 procentenheter (se ekvation 15), så om kalken innehåller 90 % CaO och 1 % fosfor så motsvarar övrigt 5 %. Energiförlusten per kg utblött elfilterstoft beräknas bli 920 kJ.

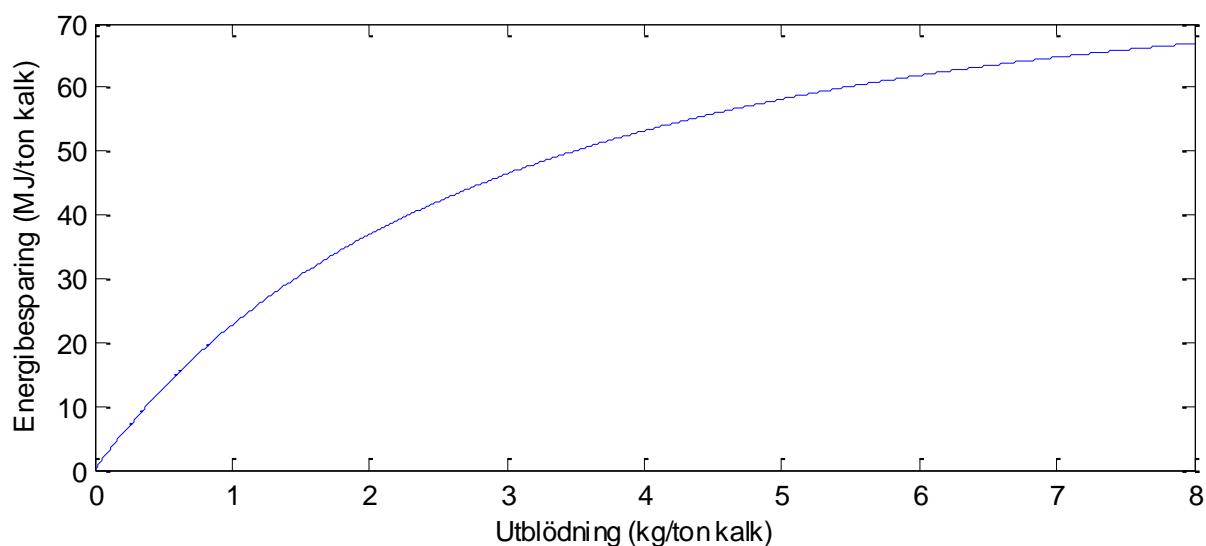
### 5.2.2.2 Fosforhalt

Resultatet från beräkningarna av mesans fosforhalt kan ses i figur 13.



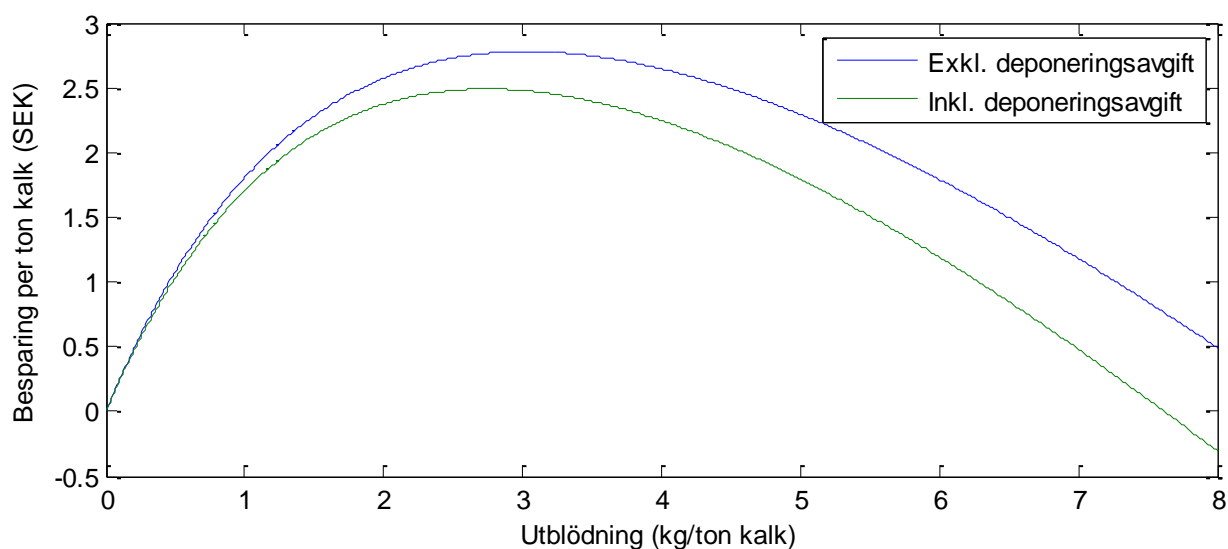
Figur 13: Beräknad fosforhalt i kalken beroende på mängd stoft som blöds ut.

Störst besparing per kg utblött elfilterstoft fås vid en låg utblödning då derivatan är som mest negativ. I figur 14 ses den beräknade energibesparingen beroende på mängd stoft som blöds ut.



Figur 14: Beräknad energibesparing beroende på mängd stoft som blöds ut.

I figur 15 ses den ekonomiska besparingen med och utan deponeringsavgift.



Figur 15: Beräknad besparing per ton kalk beroende på mängd stoft som blöds ut.

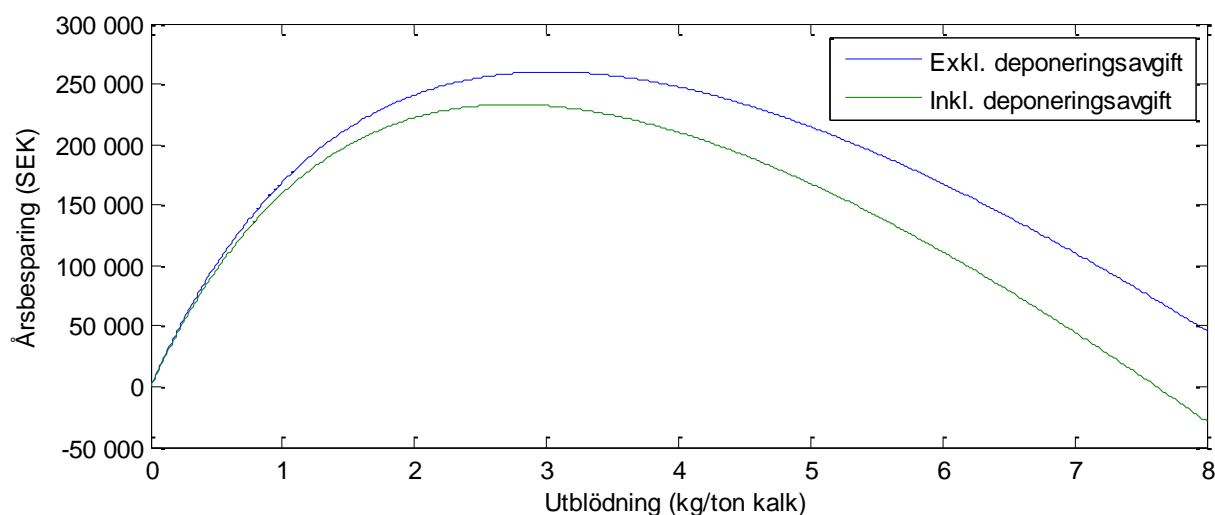
Optimal utblödning för maximal besparing ses i tabell 2.

Tabell 2: Optimal utblödningsmängd elfilterstoft och motsvarande besparing samt fosforhalt i kalken med och utan deponeringsavgift på 100 SEK/ton.

	Utblödning/ton kalk (kg/ton kalk)	Kostnadsbesparing (SEK/ton kalk)	Energibesparing (MJ/ton kalk)	Fosfor (%)
Exkl. dep.avg.	3,0	2,8	47	0,70
Inkl. dep.avg.	2,7	2,5	44	0,73

I tabell 2 ses att en utblödning av elfilterstoft kan ge en energibesparing på ungefär 45 MJ per ton producerad kalk genom att sänka fosforhalten i kalken från 1,2 % till 0,7 %.

Årsbesparingen vid en produktion på 13 ton kalk/h under 300 dygn per år, kan ses i figur 16.



Figur 16: Årsbesparing beroende på mängd stoft som blöds ut.

Den maximala årsbesparingen exklusive och inklusive deponering blir vid den produktionen 260 000 respektive 230 000 SEK.

### 5.2.3 Andra bruk

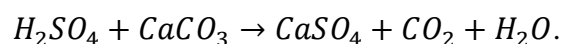
I frågeformuläret har 7 bruk svarat att de har en utblödning av elfilterstoft och 9 bruk har svarat att de inte har en utblödning.

### 5.2.4 Experiment att pH-justera restsyra

Restsyran är till utseendet gul. Vid titreringen av NaOH bildades ingen fällning utan det som okulärt kunde noteras var att den får en mer urvattnad gul färg och till utseendet liknar utspädd restsyra. En bild från försöket ses till vänster i figur 17.

När elfilterstoftet användes för att pH-justera restsyra bildades till en början ett skum när elfilterstoftet tillsattes. Det var sannolikt koldioxid som avgick och som ledde till skumbildningen. Efter att cirka 30 g elfilterstoft hade tillsatts hade lösningen blivit helt grå. När mer elfilterstoft tillsattes blev lösningen allt mer tjockare och torrare. Efter att 60 g elfilterstoft hade tillsatts var lösningen så pass torr att det bedömdes som mycket svårt att kunna lösa in mer elfilterstoft och 50 ml vatten tillsattes för att försöka få lösningen mer flytande och därmed kunna lösa en större mängd elfilterstoft i lösningen och få upp pH-värdet mer i den fortfarande mycket sura lösningen.

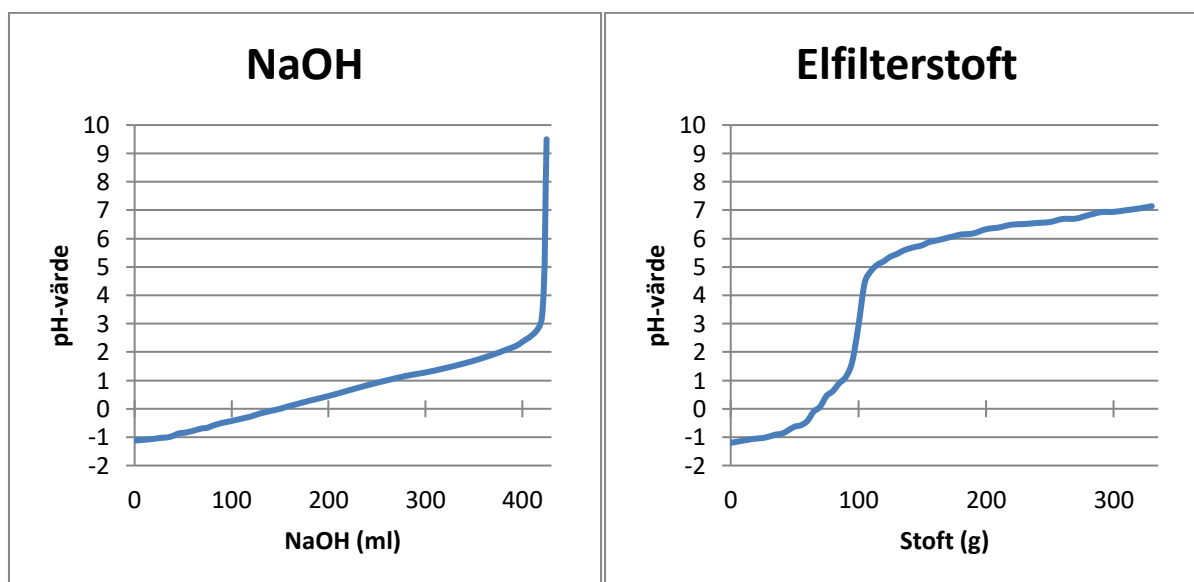
När lösningen blivit mer trögflytande bildades inte skum på samma sätt vilket gjorde att inblandningen av elfilterstoft gick enklare. När ungefär 270 g elfilterstoft hade tillsatts hade pH-värdet ökat till 6,7. Då upplevdes det som att det fanns en tendens till klumpbildning och omrörningen gjordes därför därefter mer utförligt. När 310 g elfilterstoft tillsatts hade lösningen uppnått ett pH-värde på 7,0. En bild från försöket ses till höger i figur 17. Observera att elfilterstoftet inte löser sig utan bildar kalciumsulfat, koldioxid och vatten enligt följande reaktion:





Figur 17: Till vänster ses en bild över försöket att pH-justera med NaOH och till höger ses en bild över försöket att pH-justera med elfilterstoft.

Titreringskurvorna från försök 1 och 4 kan ses i figur 18.



Figur 18: Titreringskurvor vid neutralisering av restsyra med natriumhydroxid och elfilterstoft.

Elfilterstoftet är en svag bas och pH-värdet vid ekvivalenspunkten är därför under 7. Ett neutralt pH uppnåddes vid respektive försök när ungefär 423 ml NaOH hade tillsatts samt när cirka 310 g elfilterstoft och 200 ml avjoniserat vatten hade tillsatts.

### 5.2.5 Systemlösning för uttag av elfilterstoft

Utifrån diskussion med konsulten har ett förslag på en relativt enkel systemlösning för uttag av elfilterstoft tagits fram.

Systemlösningen är att ta ut stoftet med en hastighetsreglerad slussmatare och en kedjetransportör till en container och sedan skickas på deponi. Detta skulle totalt kosta ungefär 350 000 – 400 000 SEK.

Med en kostnadsbesparing på 230 000 SEK per år skulle investeringen vara återbetald på mindre än 1 år och 9 månader.

## 6 Diskussion

### 6.1 Tröskelhöjd

Mätningen från stoppet visar att tröskeln är nednött från 61 cm till 53,5 cm från mantelplåten på dess mest nednötta ställe. Eftersom teglet har en tjocklek på 23,8 cm har den effektiva höjden på tröskeln inne i ugnen därmed minskat från 37,2 cm till 29,7 cm, alltså med cirka 20 %. Även fast tröskeln är ojämnt nednött kommer detta att ha en betydande påverkan på uppehållstiden och därmed även dess energianvändning och det riskerar även att leda till ojämn (och därmed försämrad) kvalitet på kalken eftersom flödet vid utloppsänden blir ojämnt. På grund av detta rekommenderas att gjuta en ny tröskel oavsett om man väljer att höja tröskeln eller inte. Eftersom detta medför en kostnad skulle merkostnaden för en höjning av tröskeln bli lägre än totalkostnaden för höjningen av tröskeln.

Det framgår från kartläggningen att Iggesund har en relativt låg tröskelhöjd jämfört med andra svenska sulfatmassabruk. Från den specifika energianvändningen hos de bruk som angivit både ugsndiameter och tröskelhöjd samt specifik energianvändning, så finns det inte något tydligt samband mellan tröskelhöjd och specifik energianvändning. Det är dock även många andra parametrar som skiljer mellan ugnarna, exempelvis ugsnrörens längd, torkpartiets utformning och typ av kylare. Den specifika energiförbrukningen varierar under drift och det finns därför även en osäkerhet kring hur bruken har tagit fram den angivna siffran.

Beräkningsmodellen som behandlar tröskelhöjden är en teoretisk modell som bygger på givna värden och tyvärr har det inte funnits möjlighet att kalibrera den mot empiriska data. Det går därför inte att säga hur tillförlitligt modellens resultat är. Sannolikt är minskningen av energiförbrukningen lite optimistisk om man jämför med hur det ser ut i andra bruk. Det är även osannolikt att den skulle fortsätta mot en minskad energiförbrukning om man skulle extrapolera kurvan mot en ännu högre tröskel. Modellen fungerar dock i stort som förväntat eftersom uppehållstiden ökar med en högre tröskel vilket även minskar energiförbrukningen, innehållets massa i ugnen ökar och en högre gashastighet uppnås.

Ugnsleverantören varnar för att belastningen på stödet närmast utloppsänden, vid en höjning till 93 cm, skulle bli högre än vad de kan garantera att den klarar långsiktigt. Detta bör tas på största allvar och man bör därför vidta försiktighetsåtgärder angående det genom att bland annat utreda om det i så fall går att balansera om ugnen.

En annan farhåga som har funnits är att eftersom en högre tröskel leder till en ökad gashastighet på sekundärluften vid tröskeln, så skulle det även kunna leda till en ökad damning och det skulle minska värmeöverföringen från lågan till bädden. Detta har tagits upp med konsulten och han menar att dammet runt lågan i första hand kommer från kylaren, och där kommer gashastigheten inte att förändras vid en höjning av tröskeln. Detta är därför sannolikt inte något problem så länge inte ugnens produktion ökas. En ökad produktion skulle däremot kunna leda till en ökad damning eftersom lufthastigheten i kylaren då skulle öka.

Övriga behandlade frågor angående förbränningsbetingelser och damning kommer sannolikt inte välla några problem. Det är dock viktigt att tröskeln designas på rätt sätt för att ge bra förbränningsbetingelser.

Min rekommendation kring mesaugnens tröskelhöjd är att höja den till 72–80 cm över mantelplåten. Med det så blir inte den mekaniska belastningen på det första stödet mindre än om den skulle höjas till 92 cm, men det finns en stor potentiell energibesparing. Detta skulle enligt modellen leda till en minskning av den specifika energianvändningen med ungefär 200 MJ/ton producerad kalk till en uppskattad total kostnad på ungefär 700 000 – 800 000 SEK. Ett alternativ till att få en besparing går det att utnyttja den högre tröskeln till att höja mesaugnens produktion av kalk. Det bör dock finnas i åtanke att den specifika energiförbrukningen vid en högre produktion då också sannolikt skulle bli högre.

## 6.2 Utblödning av elfilterstoft

Det gjordes provtagningar vid tre skilda tillfällen för att få säkrare värden på elfilterstoftets kemiska innehåll. Provtagningarna utfördes under andra halvan av februari och vid tillfällen då det var normal drift och det inte tillsattes någon köpkalk till processen. Syftet med detta är att få mer rättvisande värden. Medelvärde från mätningarna kan därför anses ge en adekvat bild på mesans normala sammansättning.

Energiberäkningarna är teoretiskt uträknade för processen utan några förluster. Verkliga värden har sedan använts för att bedöma förluster som sedan allokerats till olika beståndsdelar. Valet att studera kalciumoxid, fosfor och övrigt är för att dessa bedömdes vara mest intressanta för detta projekt och kategorin övrigt har schablonmässigt räknats som kalciumkarbonat som enbart värms upp i processen utan att reagera på något sätt. Det sistnämnda har sannolikt en begränsad påverkan eftersom det innehåller en del kalciumkarbonat och dessutom så är andelen övrigt i kalken relativt liten.

Anledningen till den höga energianvändningen för att torka och värma 10 kg fosfor, är att fosfor binder med kalcium och syre och bildar  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , vilket leder till att hela molekylen måste värmas och inte bara fosfor.

Beräkningarna över optimal mängd utblödning, visar att det inte behöver blödas ut några större mängder för att uppnå den optimala utblödningen. Detta gör att avgifterna för deponi sannolikt inte heller blir så höga. Konsulten har bedömt resultaten som rimliga angående mängd utblödning, uppnådd fosforhalt och den ekonomiska beräkningen. Att flertalet andra bruk har en utblödning av elfilterstoft från mesaugnen pekar på att det är fler som har bedömt detta som lönsamt.

Experimentet med pH-justering av restsyra gav ett intressant resultat att det är möjligt att utföra. Här finns det en stor ekonomisk potential eftersom natriumhydroxiden som används för att neutralisera restsyran är dyr att köpa in. Det krävs dock vidare studier kring detta för att bedöma hur och om det praktiskt kan genomföras och vad man i så fall kan göra med restprodukten från detta.

Min slutliga rekommendation kring utblödning av elfilterstoft är att installera det. Det skulle ge en besparing på ungefär 45 MJ/ton producerad kalk och en årlig kostnadsbesparing på 200 000 – 260 000 SEK. Den totala kostnaden uppskattas bli ungefär 350 000 – 400 000 SEK.

## 6.3 Andra förbättringsförslag

### 6.3.1 Brännaren

Vid diskussioner med operatörer har det framkommit att den nuvarande kapaciteten hos mesaugnen för närvarande är ungefär 80 % av dess specificerade kapacitet. När produktionen ökas mer än detta sjunker temperaturen vid brännaren. Det hjälper heller inte att i det läget öka oljeflödet till brännaren eftersom då behöver även sekundärluften ökas för att nå rätt syreöverskott, och värmen flyttas då istället längre bak i ugnen, vilket i sin tur riskerar att leda till för hög värme i elfiltret. När temperaturen sjunker i ugnen sjunker även temperaturen hos mesan och därmed minskar spjälkningens hastighet, vilket leder till att andelen bränd kalk även minskar. Detta gör att en högre dosering av kalk krävs i släckaren för att uppnå samma kvalitet på vitluten. Det motverkar med andra ord produktionsökningen och i praktiken sjunker därför den möjliga produktionen av vitlut.

Vad orsaken till detta är finns det flera hypoteser till. En hypotes är att det beror på att när ugnen var ny så togs primärluften inifrån lokalen. Luften där var dock dammig och därför flyttades intaget för primärluft efter något år till utsidan istället. Brännaren kan därför ha blivit smutsig invändigt och den går kanske enbart att rengöra på ett tillfredsställande sätt genom att plocka isär den vilket man aldrig gjort. Detta kan ha lett till att förbränningsbetingelserna har försämrats och skulle därmed kunna vara orsaken till ovan nämnda problem med ugnens temperaturprofil vid hög last.

En annan hypotes är att problemet beror på att brännaren alltid har samma primärluftsflöde och att all reglering av luft sker med sekundärluften. Detta görs efter tillverkarens instruktioner, men hypotesen är att mängden primärluft skulle behöva regleras efter oljeflödet, speciellt över en viss nivå. Det i så fall skulle ge stabilare förbränningsbetingelser och därmed även en bättre temperaturprofil i ugnen.

### 6.3.2 Dosering av kalk

Idag doseras kalken till vitluten enbart efter temperaturskillnaden mellan grönluten som kommer in och vitluten som går ut (eftersom reaktionen är starkt exoterm). Ett problem är att temperaturen på kalken påverkar temperaturskillnaden. Exempelvis så är köpkalk kallare än nyproducerad kalk från mesaugnen. Normalt sett så blandas det in en mindre andel köpkalk, men vid problem kan det bli en större andel köpkalk behöva matas in. Detta ger inte optimala förutsättningar att tillverka en stabil kvalitet på vitluten. Med en mätrobot som kan mäta koncentrationen av  $\text{CaCO}_3$  på ett tillförlitligt sätt skulle ett automatiskt system kunna reglera kalkdoseringen på ett stabilare sätt.



## 7 Slutsats

Projektets syfte var att undersöka den tekniska och ekonomiska potentialen att minska mesaugnens energianvändning genom de två förslagen: att utblöda elfilterstoft från mesaugnen och att höja mesaugnens tröskel. Målet var att klarlägga huruvida det är ekonomiskt lönsamt att blöda ut elfilterstoft, samt ge en rekommendation till en optimal tröskelhöjd i mesaugnen.

Mätningar på mesaugnens tröskel visar att den effektiva höjden där den är som mest nednött är cirka 20 % lägre än original. Detta ger sannolikt en varierande kvalitet på kalken och en sämre driftsekonomi så tröskeln bör åtminstone höjas till originalhöjden. Simuleringen som har utförts i MATLAB visar att en högre tröskel ger en minskad specifik energianvändning. Om simuleringen ger ett tillförlitligt resultat är dock svårt att avgöra eftersom den inte kunnat kalibreras mot empiriska data. Det går dock att konstatera att Iggesunds bruk har en lägre tröskel än de flesta andra sulfatmassabruk och en höjd tröskel rekommenderas därför. En viss försiktighet bör dock iaktas eftersom en höjd tröskel skulle göra att tyngden på det första stödet skulle överskrida belastningen som ugnstillverkaren kan ge garantier för. Utifrån detta rekommenderas Iggesund att höja tröskeln till 72–80 cm. Den uppskattade energibesparingen skulle med det bli ungefär 200 MJ/ton kalk.

Från kartläggningen av andra svenska sulfatmassabruk kan det konstateras att 7 av 16 har en utblödning av elfilterstoft. Experimentet för att undersöka om elfilterstoft kan användas till att pH-justera restsyra visar att det går, men lösningen blev grå och trögflytande och vidare studier krävs för att fastställa om metoden är att rekommendera. Att bygga ett system för utblödning genom att ta ut stoftet med en hastighetsreglerad slussmatare och en kedjetransportör till en container skulle kosta 350 000 – 400 000 SEK. De beräkningar som har utförts visar att en utblödning på 2,7 kg per ton elfilterstoft skulle ge en energibesparing på ungefär 45 MJ/ton producerad kalk och en kostnadsbesparing på 200 000 – 260 000 SEK per år.

Rekommendationen blir därför att bygga en utblödning och lägga avsättningen på deponi.

## Referenslista

Alvarez, H. (2006). *Energiteknik*. 3 uppl. Lund: Studentlitteratur AB.

Atkins, P. & Jones, L. (2010). *Chemical Principles: The Quest For Insight, With Unique International Edition Problem Sets*. 5. uppl. New York: W. H. Freeman and Company.

Borg, O. F. (1993). *Y-214 Vitlutsberedning*. 4. uppl. Markaryd: Skogsindustrins Utbildning i Markaryd AB.

Cengel, Y. & Boles, M. (2011). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 7. uppl. New York: McGraw-Hill.

Iggesund Paperboard (2017). *Produktkatalogen 2017-2018* [broschyr].  
[https://www.iggesund.com/globalassets/iggesund-documents/product-catalogue/se/pc2017\\_2018\\_se.pdf](https://www.iggesund.com/globalassets/iggesund-documents/product-catalogue/se/pc2017_2018_se.pdf)

Jirvall, N. (red.) (1995). *Miljöinfo från Skogsindustrierna*. Stockholm: Media express

Moore, J.W., Stanitski, C. L. & Jurs, P. C. (2011). *Chemistry: The Molecular Science International Edition*. 4. uppl. Boston: Cengage Learning.

Tall Oil Community (u.å.). *Råtallolja: Information om tallolja & utvinningsprocessen*.  
<https://talloilcommunity.com/tallolja/> [2019-08-21]

## Opublicerat material

Leppänen, K. & Sahlin, E. (2016). *Resultat*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

# Bilaga 1

% Simulering mesaugn - David Olsson

```
clear all
close all
clc
```

% Konstanter

```
d_CaCO3 = 2.76; % Densitet CaCO3 (kg/l)
d_CaO = 3.34; % Densitet CaO (kg/l)
M_CaCO3 = 100.09; % Molmassa (g/mol)
M_CaO = 56.08; % Molmassa (g/mol)
cp_CaCO3_g = 0.8343; % Värmekapacitet för kalciumkarbonat (J/gK)
cp_CaCO3 = cp_CaCO3_g*M_CaCO3; % Värmekapacitet för kalciumkarbonat (J/molK)
cp_CaO = 54; % Värmekapacitet för kalciumoxid (J/molK)
entalpi_kalk = 178.3*1000; % Entalpi för reaktionen CaCO3-->CaO+CO2 (J/mol)
radie_ugn = 3.274/2; % Ugnsrörets innerradie på teglet (m)
radie_brannare = 0.539/2; % Brännarens radie (m)
lutning_ugn = 0.0225; % Ugnsrörets lutning
langd_ugn = 81; % Ugnsrörets längd (m)
andel_CaO = 0.9;
```

% Variabler

```
hojning = 0.0; % Höjning av tröskel (m)
k_E = 1; % Relativ energianvändning (ändras med höjningen av tröskeln för att ge samma maxtemperatur)
```

```
h_min = 0.255; % Lägsta mesahöjd i ugnsröret (m)
lutning_mesa = 0.010; % Mesans lutning jämfört med horisontalplanet
k = 181; % Värmeöverföringskonstant (kalibreras efter data från tidigare studie)
T_mesa_in = 400*k_E; % Temperatur på inkomande mesa (°C)
m_f_mesa_h = 22; % Massflöde mesa (ton/h)
```

```
m_f_mesa_s = m_f_mesa_h*1000/(60*60); % Massflöde mesa (kg/s)
volym_f_mesa = m_f_mesa_s/d_CaCO3/1000; % Volymflöde mesa (m^2/s)
troskel = (0.61+(3.75-2.68)/2)/2-0.238+hojning; % Tröskelhöjd innanför tegel (m)
% troskel = 0.93-0.238;
mol_CaCO3 = (m_f_mesa_s*1000)/M_CaCO3; % Antal mol CaCO3 (mol/s)
```

% Skapar tomma variabler

```
i=1; % Räknar while-loopen (simulerade sekunder)
V=0; % Används till att räkna ut volymen i ugnen (m^3)
h_mesa = zeros(100001,1); % Höjdvektor på mesan/kalken (m)
L = zeros(100001,1); % Längdvektor (m)
yt_area=zeros(100001,1); % Vektor med mesans/kalkens ytarea (m^2)
T_yt = zeros(100001,1); % Vektor med yttemperaturer i ugnen (°C)
T_mesa = zeros(100001,1); % Vektor med temperatur på mesan (°C)
t_area_gas = zeros(100001,1); % Vektor med temperatur på gasen (°C)
v_andel_CaO = zeros(100001,1); % Volymandel CaO/(CaO+CaCO3)
volym_f = zeros(100001,1);
```

```
T_mesa(1) = T_mesa_in;
```

```
% Skapar polynom över yttemperaturer i mesaugnen anpassat till data från
% tidigare rapport om mesaugnen
[num,txt,row] = xlsread('yttemperatur.xlsx');
```

```

x1 = num(1:16,1)*(langd_ugn/82); % Justerar fel i tidigare rapport där det
står att ugnen är 82 meter
ytstigtemp = num(1:16,2);
x2 = num(16:19,1)*(langd_ugn/82);
ytsjunktemp = num(16:19,2);
p1 = polyfit (x1,ytstigtemp,3); % Polynom för temperaturökningen
p2 = polyfit (x2,ytsjunktemp,2); % Polynom för temperaturminskningen

% Beräkningar i sekundsteg genom ugnen (börjar vid inloppssidan)
while L(i)<langd_ugn-2.050 % Sista 2,05 m är utloppet efter ugnen

    % Mesans/kalkens höjd beräknas (över teglet)
    h = troskel-(langd_ugn-2.050-L(i))*(lutning_ugn-lutning_mesa); % Höjden
beräknad från tröskeln beroende på ugnens och mesatytans lutningar
    if h > h_min
        h_mesa(i) = h;
    else
        h_mesa(i) = h_min;
    end

    % Väljer polynom beroende på läge i ugnen
    if L(i)<(74*(langd_ugn/82))
        p=p1;
    else
        p=p2;
    end

    t_area_mesa = radie_ugn^2*(acos(1-h_mesa(i)/radie_ugn)-(1-
h_mesa(i)/radie_ugn)*sqrt(1-(1-h_mesa(i)/radie_ugn)^2)); % Mesans
tvärsnittsarea (m^2)
    omkrets = 2*radie_ugn*(acos(1-h_mesa(i)/radie_ugn)+sqrt(1-(1-
h_mesa(i)/radie_ugn)^2)); % Mesans omkrets över ytan (m)
    T_yt(i) = k_E*polyval(p,L(i)); % Yttemperatur (°C)

    % Bestämmer zon
    if T_mesa < 900 % Uppvärmningszon

        volym_f(i) = volym_f_mesa; % Volymflöde mesa/kalk (m^3/s)
        langd_s = volym_f(i)/t_area_mesa; % Sträckan mesan/kalken rör sig
på en sekund (m)
        mol_CaCO3 = volym_f(i)*1000000*d_CaCO3/M_CaCO3; % Mol CaCO3 (mol)
        yt_area(i) = omkrets*langd_s; % Mesans ytarea (m^2)
        E(i) = (yt_area(i)*(T_yt(i)-T_mesa(i))*k); % Tillförd energi till
mesa/kalk (J)
        T_mesa(i+1) = T_mesa(i)+E(i)/(cp_CaCO3*mol_CaCO3); % Mesans
temperatur (°C)

    elseif v_andel_CaO < andel_CaO % Förbränningszon
        volym_f(i) = ((v_andel_CaO(i-1)*M_CaO/(d_CaO*1000)+(1-
v_andel_CaO(i-
1))*M_CaCO3/(d_CaCO3*1000))/(M_CaCO3/(d_CaCO3*1000)))*volym_f_mesa; %
Volymflöde mesa/kalk (m^3/s)
        langd_s = volym_f(i)/t_area_mesa; % Sträckan mesan/kalken rör sig
på en sekund (m)
        yt_area(i) = omkrets*langd_s; % Mesans ytarea (m^2)
        E(i) = (yt_area(i)*(T_yt(i)-T_mesa(i))*k); % Tillförd energi till
mesa/kalk (J)

        mol_CaCO3 = volym_f(i)*1000000*(1-v_andel_CaO(i-
1))*d_CaCO3/M_CaCO3; % Mängd CaCO3 (mol)

```

```

        mol_CaO = volym_f(i)*1000000*v_andel_CaO(i-1)*d_CaO/M_CaO; % Mängd
CaO (mol)
        reagerad_mol = E(i)/(entalpi_kalk); % Antal mol CaCO3 som reagerar
        mol_CaCO3 = mol_CaCO3-reagerad_mol; % CaCO3 (mol) efter reaktion
        volym_CaCO3 = mol_CaCO3*M_CaCO3/d_CaCO3; % Volym CaCO3
        volym_CaO = (mol_CaO+reagerad_mol)*M_CaO/d_CaO; % Volym CaO
        v_andel_CaO(i) = volym_CaO/(volym_CaCO3+volym_CaO); % Volymandel
CaO
        if v_andel_CaO(i) >= andel_CaO
            v_andel_CaO(i:end) = andel_CaO;
            volym_f(i) = ((v_andel_CaO(i-1)*M_CaO/(d_CaO*1000)+(1-
v_andel_CaO(i-
1))*M_CaCO3/(d_CaCO3*1000))/(M_CaCO3/(d_CaCO3*1000)))*volym_f_mesa; %
Volymflöde kalk (m^3/s)
            volym_f(i:end) = volym_f(i);
        end

        T_mesa(i+1) = T_mesa(i); % Mesans/kalkens temperatur (°C)
    else % Sintringszon
        yt_area(i) = omkrets*langd_s; % Mesans ytarea (m^2)
        E(i) = (yt_area(i)*(T_yt(i)-T_mesa(i))*k); % Tillförd energi till
mesa/kalk (J)
        mol_CaCO3 = volym_f(i)*1000000*(1-v_andel_CaO(i-
1))*d_CaCO3/M_CaCO3; % Mängd CaCO3 (mol)
        mol_CaO = volym_f(i)*1000000*v_andel_CaO(i-1)*d_CaO/M_CaO; % Mängd
CaO (mol)
        T_mesa(i+1) = T_mesa(i)+E(i)/(cp_CaO*mol_CaO+cp_CaCO3*mol_CaCO3); %
Kalkens temperatur (°C)
    end

    % Beräkning av luftens tvärsnittsarea
    t_area_brannare = radie_brannare^2*pi;
    lutning_troskel = ((3.274-2.530)/2)/1.450;
    radie_ugn_troskel = radie_ugn-(troskel-lutning_troskel*(langd_ugn-
2.050-L(i)));

    if radie_ugn<radie_ugn_troskel
        radie_ugn_2 = radie_ugn;
    else
        radie_ugn_2 = radie_ugn_troskel;
    end
    h_mesa_2 = h_mesa(i)-(radie_ugn-radie_ugn_2);
    t_area_ugn = radie_ugn_2^2*pi;
    t_area_mesa_2 = radie_ugn_2^2*(acos(1-h_mesa_2/radie_ugn_2)-(1-
h_mesa_2/radie_ugn_2)*sqrt(1-(1-h_mesa_2/radie_ugn_2)^2)); % Mesans
tvärsnittsarea (m^2)

    if L(i) > langd_ugn-2.050-0.7; % Brännaren går förbi tröskeln med 0,7 m
        t_area_gas(i) = t_area_ugn-t_area_brannare-t_area_mesa_2;
    else
        t_area_gas(i) = t_area_ugn-t_area_mesa_2;
    end

    L(i+1)=L(i)+langd_s; % Håller reda på var i ugnen den beräknar (m)
    V=V+volym_f; % Total volym mesa i ugnen (m^3)
    i=i+1; % Sekundräknare (en "while-loop" motsvarar en sekund)
end

```

```

i=i-1;

% Tar bort tomma rader
h_mesa = h_mesa(1:i,:);
L = L(1:i,:);
T_yt = T_yt(1:i,:);
yt_area = yt_area(1:i,:);
T_mesa = T_mesa(1:i,:);
t_area_gas = t_area_gas(1:i,:);
v_andel_CaO = v_andel_CaO(1:i);
volym_f = volym_f(1:i);

gashastighet_t = 20.62./t_area_gas;
gashastighet_b = 34.99./t_area_gas;

% Ritar grafer över mesans höjd och temperatur
plot(L,h_mesa)
ylim([0 inf])
title('Mesans höjd i mesaugnen')
figure
plot(L,T_mesa)
hold on
plot(L,T_yt,'r')
ylim([0 inf])
hold off
title(['Tröskelhöjd: ',num2str(0.61+hojning),' m'])
legend('Mesa-temperatur (°C)', 'Yt-temperatur (°C)')
figure
plot(L,t_area_gas)
ylim([0 inf])

LIndex = find(L > langd_ugn-2.050-0.7);

max_T = max(T_mesa); % Maxtemperatur (används till kalibrering)
massa = volym_f.*v_andel_CaO*d_CaO+volym_f.*(1-v_andel_CaO)*d_CaCO3;
M=sum(massa);

dT = max_T-1.216156898192648e+03;

% Skriver ut uppehållstiden
h=(i-rem(i,3600))/3600;
m=rem(i,3600)/60;
fprintf('Uppehållstid: %.0f h och %.0f min\nMaxtemperatur: %.1f°C \ndT = %.3f°C \nMassa: %.1f ton\nGashastighet (tröskel): %.2f m/s\nGashastighet (brännare): %.2f m/s\n\n', h,m,max_T,dT,M,max(gashastighet_t),min(gashastighet_b(LIndex)))

```

## Bilaga 2

% Utblödning av elfilterstoft - David Olsson

```
clear all
close all
clc

%cp_CaCO3 = 82.34+4.975*10^-2*T-12.87*10^5*T^-2; % This expression is
apparently good between 1033>T>273 (0C to 760 C). Reference: Table 2B,
Elementary Principles of Chemical Processes-by Felder and Rousseau (ISBN
0471743305)
%int_cp_CaCO3 = 82.34*T+4.975*10^-2/2*T^2+12.87*10^5*T^-1;
%cp_H2O = 32.24+0.1923*10^-2*T+1.055*10^-5*T^2-3.595*10^-9*T^3; %
Thermodynamics table A-2
%int_H2O = 32.24*(T)+0.1923*10^-2/2*T^2+1.055*10^-5/3*T^3-3.595*10^-
9*T/4^4;
%cp_CO2 = 22.26+5.981*10^-2*T-3.501*10^-5*T^2+7.469*10^-9*T^3;
%int_cp_CO2 = 22.26*T+5.981*10^-2/2*T^2-3.501*10^-5/3*T^3+7.469*10^-
9/4*T^4;
%cp_CaO = 49.95403+4.887916*T/1000-0.352056*(T/1000)^2+0.046187*(T/1000)^3-
0.825097*(T/1000)^-2;
%int_cp_CaO = 49.95403*T+4.887916/(2*1000)*T^2-
0.352056/(3*1000^2)*T^3+0.046187/(4*1000^3)*T^4+0.825097*1000^2*T^-1;
%cp_luft = 28.11+0.19*10^-2*T+0.4802*10^-5*T^2-1.1966*10^-9*T^3;
%int_cp_luft = 28.11*T+0.19*10^-2/2*T^2+0.4802*10^-5/3*T^3-1.1966*10^-
9/4*T^4;
%cp_Ca3PO42 = 203.3+170.1*10^-3*T-26.11*10^5*T^-2;
%int_cp_Ca3PO42 = 203.3*T+170.1*10^-3/2*T^2+26.11*10^5*T^-1;

torrhalt = 0.8; % Mesans torrhalt efter mesafiltret
M_CaCO3 = 100.09; % (g/mol)
M_CaO = 56.08; % (g/mol)
M_P = 30.97;
M_Ca3PO42 = 310.18;
M_H2O = 18.015; % (g/mol)
cp_H2O_f_m = 4.2; % (J/gK) TD table A-3
cp_H2O_f = cp_H2O_f_m*M_H2O; % (J/molK)
h_fg_H2O_m = 2257; % (J/g) TD table A-3
h_fg_H2O = h_fg_H2O_m*M_H2O; % (J/mol)
h_spjalkning = 178300; % (J/mol) uträknat

T_in_mesa = 70+273; % (K)
T_fg_H2O = 100+273; % (K)
T_ut_gas = 300+273; % (K)
T_max_mesa = 900+273; % (K)
T_max_kalk = 1200+273;
T_in_gas = 0+273; % (K)
T_ut_kalk = 180+273; % (K)
% dT_mesa = T_max_mesa-T_in_mesa; % (K)

andel_CaO = 0.90;
massa_kalk = 1000000; % (g)
massa_CaO = 1000000*andel_CaO;
mol_CaO = massa_CaO/M_CaO; % (mol)
mol_CaCO3 = mol_CaO; % (mol) mol_CaCO3=mol_CaO
massa_CaCO3 = mol_CaCO3*M_CaCO3; % (g)

% CaCO3
```

```

E_CaCO3_mol = 82.34*(T_max_mesa-T_in_mesa)+4.975*10^-2/2*(T_max_mesa^2-
T_in_mesa^2)+12.87*10^5*(T_max_mesa^-1-T_in_mesa^-1); % Energi/mol för att
värma upp CaCO3 (J/mol)
E_CaCO3_mol_sp = E_CaCO3_mol+h_spjalkning; % Energi/mol för uppvärmning och
spjälkning av CaCO3->CaO+CO2 (J/mol)
E_CaCO3_uppvärmning = E_CaCO3_mol*mol_CaCO3; % Total energi för (endast)
uppvärmning av CaCO3 (J)
E_CaCO3 = E_CaCO3_mol_sp*mol_CaCO3; % Total energi för uppvärmning och
spjälkning av CaCO3 (J)

E_CaCO3_efs_mol = 82.34*(T_ut_gas-T_in_mesa)+4.975*10^-2/2*(T_ut_gas^2-
T_in_mesa^2)+12.87*10^5*(T_ut_gas^-1-T_in_mesa^-1); % (J/mol)
mol_CaCO3_kg = 1000/M_CaCO3;
E_CaCO3_efs = E_CaCO3_efs_mol*mol_CaCO3_kg;

% CO2 från CaCO3
mol_CO2 = mol_CaO; % Bildad CO2 från reaktionen CaCO3->CaO+CO2 (mol)
E_CO2_mol = 22.26*(T_ut_gas-T_max_mesa)+5.981*10^-2/2*(T_ut_gas^2-
T_max_mesa^2)-3.501*10^-5/3*(T_ut_gas^3-T_max_mesa^3)+7.469*10^-
9/4*(T_ut_gas^4-T_max_mesa^4); % Energi/mol som gasen avger innan den
släpps ut (J/mol)
E_CO2 = E_CO2_mol*mol_CO2; % Total energi som gasen avger innan den släpps
ut (J/mol)
E_CO2_mol_1 = 22.26*(T_in_gas-T_ut_gas)+5.981*10^-2/2*(T_in_gas^2-
T_ut_gas^2)-3.501*10^-5/3*(T_in_gas^3-T_ut_gas^3)+7.469*10^-
9/4*(T_in_gas^4-T_ut_gas^4); % Energi/mol som gasen innehåller när den
släpps ut i skorstenen (J/mol)
E_CO2_1 = E_CO2_mol_1*mol_CO2; % Total energi som gasen innehåller när den
släpps ut i skorstenen (J/mol)

% CaO
E_CaO_mol_1 = 49.95403*(T_max_kalk-
T_max_mesa)+4.887916/(2*1000)*(T_max_kalk^2-T_max_mesa^2)-
0.352056/(3*1000^2)*(T_max_kalk^3-
T_max_mesa^3)+0.046187/(4*1000^3)*(T_max_kalk^4-
T_max_mesa^4)+0.825097*1000^2*(T_max_kalk^-1-T_max_mesa^-1); % Energi/mol
för att värma upp CaO till maximal temperatur (J/mol)
E_CaO_mol_2 = 49.95403*(T_ut_kalk-
T_max_kalk)+4.887916/(2*1000)*(T_ut_kalk^2-T_max_kalk^2)-
0.352056/(3*1000^2)*(T_ut_kalk^3-
T_max_kalk^3)+0.046187/(4*1000^3)*(T_ut_kalk^4-
T_max_kalk^4)+0.825097*1000^2*(T_ut_kalk^-1-T_max_kalk^-1); % Energi/mol
som avges när CaO kyls (J/mol)
E_CaO_mol = E_CaO_mol_1+E_CaO_mol_2; % Energi/mol från CaO (J/mol)
E_CaO = E_CaO_mol*mol_CaO; % Total energi från CaO (J)
E_CaO_1 = E_CaO_mol_1*mol_CaO; % Total energi för att värma CaO till
maximal temperatur (J)
E_CaO_mol_3 = 49.95403*(T_in_mesa-
T_ut_kalk)+4.887916/(2*1000)*(T_in_mesa^2-T_ut_kalk^2)-
0.352056/(3*1000^2)*(T_in_mesa^3-
T_ut_kalk^3)+0.046187/(4*1000^3)*(T_in_mesa^4-
T_ut_kalk^4)+0.825097*1000^2*(T_in_mesa^-1-T_ut_kalk^-1); % Energi/mol kvar
i CaO när den lämnar kylaren (J/mol)
E_CaO_3 = E_CaO_mol_3*mol_CaO; % Total energi kvar i CaO när den lämnar
kylaren (J/mol)

% Ca3(PO4)2
kvot = M_Ca3PO42/(2*M_P); % Vikt Ca3(PO4)2 per fosfor (P)
andel_P = 0.0123; % Viktprocent fosfor i kalken
massa_P = massa_kalk*andel_P; % Fosfor (g)
mol_P = massa_P/M_P; % Fosfor (mol)

```



```

mol_Ca3PO42 = mol_P/2; % Ca3(PO4)2 (mol)
massa_Ca3PO42 = mol_Ca3PO42*M_Ca3PO42; % Ca3(PO4)2 (g)
E_Ca3PO42_mol_1 = 203.3*(T_max_kalk-T_in_mesa)+170.1*10^-3/2*(T_max_kalk^2-
T_in_mesa^2)+26.11*10^5*(T_max_kalk^-1-T_in_mesa^-1); % Energi/mol för att
värma upp Ca3(PO4)2 till maximal temperatur (J/mol)
E_Ca3PO42_mol_2 = 203.3*(T_ut_kalk-T_max_kalk)+170.1*10^-3/2*(T_ut_kalk^2-
T_max_kalk^2)+26.11*10^5*(T_ut_kalk^-1-T_max_kalk^-1); % Energi/mol som
avges när Ca3(PO4)2 kyls (J/mol)
E_Ca3PO42_mol = E_Ca3PO42_mol_1+E_Ca3PO42_mol_2; % Energi/mol för att värma
Ca3(PO4)2 (J/mol)
E_Ca3PO42 = E_Ca3PO42_mol*mol_Ca3PO42; % Total energi för att värma
Ca3(PO4)2 (J)
E_Ca3PO42_1 = E_Ca3PO42_mol_1*mol_Ca3PO42; % Total energi för att värma
Ca3(PO4)2 till maximal temperatur (J)

% Övrigt (räknar som CaCO3)
massa_annat = massa_kalk-(massa_Ca3PO42+massa_CaO); % Övrig torrs substans
(g)
mol_annat = massa_annat/M_CaCO3; % Övrig torrs substans (mol)
E_annat_mol_1 = 82.34*(T_max_kalk-T_in_mesa)+4.975*10^-2/2*(T_max_kalk^2-
T_in_mesa^2)+12.87*10^5*(T_max_kalk^-1-T_in_mesa^-1); % Energi/mol för att
värma upp "övrigt" till maximal temperatur (J/mol)
E_annat_mol_2 = 82.34*(T_ut_kalk-T_max_kalk)+4.975*10^-2/2*(T_ut_kalk^2-
T_max_kalk^2)+12.87*10^5*(T_ut_kalk^-1-T_max_kalk^-1); % Energi/mol som
avges när "övrigt" kyls (J/mol)
E_annat_mol = E_annat_mol_1 + E_annat_mol_2; % Energi/mol för att värma
"övrigt" (J/mol)
E_annat = E_annat_mol*mol_annat; % Total energi för att värma "övrigt" (J)
E_annat_1 = E_annat_mol_1*mol_annat; % Total energi för att värma "övrigt"
till maximal temperatur (J)

% H2O
massa_mesa_t = massa_CaCO3+massa_Ca3PO42+massa_annat; % Torrs substans i
mesan (g)
massa_H2O = (massa_mesa_t)*(1-torrhalt)/torrhalt; % H2O (g)
mol_H2O = massa_H2O/M_H2O; % H2O (mol)
E_H2O_mol_fg = cp_H2O_f*(T_fg_H2O-T_in_mesa)+h_fg_H2O; % Energi/mol för
uppvärmning (till koktemperatur) och förångning av vattnet (J/mol)
E_H2O_mol_g = 32.24*(T_ut_gas-T_fg_H2O)+0.1923*10^-2/2*(T_ut_gas^2-
T_fg_H2O^2)+1.055*10^-5/3*(T_ut_gas^3-T_fg_H2O^3)-3.595*10^-
9/4*(T_ut_gas^4-T_fg_H2O^4); % Energi/mol för att värma upp vattenång till
dess temperatur när den släpps ut (J/mol)
E_H2O_mol_tot = E_H2O_mol_fg+E_H2O_mol_g; % Energi/mol för uppvärmning,
förångning och överhettning av vattnet (J/mol)
E_H2O = mol_H2O*E_H2O_mol_tot; % Total energi för uppvärmning, förångning
och överhettning av vattnet (J)
E_H2O_2_mol = 32.24*(T_in_gas-T_ut_gas)+0.1923*10^-2/2*(T_in_gas^2-
T_ut_gas^2)+1.055*10^-5/3*(T_in_gas^3-T_ut_gas^3)-3.595*10^-
9/4*(T_in_gas^4-T_ut_gas^4); % Energi/mol som H2O innehåller när den släpps
ut i skorstenen (J/mol)
E_H2O_2 = mol_H2O*E_H2O_2_mol; % Total energi som gasen innehåller när den
släpps ut i skorstenen (J)

massa_H2O_Ca3PO42 = massa_Ca3PO42*(1-torrhalt)/torrhalt; % Totalt H2O
innehåll i Ca(PO4)2 (g)
mol_H2O_Ca3PO42 = massa_H2O_Ca3PO42/M_H2O; % Totalt H2O innehåll i Ca(PO4)2
(mol)
E_H2O_Ca3PO42 = mol_H2O_Ca3PO42*E_H2O_mol_tot; % Total energi för
uppvärmning, förångning och överhettning av H2O innehåll i Ca(PO4)2 (J/mol)

```

```

massa_H2O_CaCO3 = massa_CaCO3*(1-torrhalt)/torrhalt; % Totalt H2O innehåll
i CaCO3 (g)
mol_H2O_CaCO3 = massa_H2O_CaCO3/M_H2O; % Totalt H2O innehåll i CaCO3 (mol)
E_H2O_CaCO3 = mol_H2O_CaCO3*E_H2O_mol_tot; % Total energi för uppvärmning,
förångning och överhettning av H2O innehåll i CaCO3 (J/mol)

massa_H2O_annat = massa_annat*(1-torrhalt)/torrhalt; % Totalt H2O innehåll
i "övrigt" (g)
mol_H2O_annat = massa_H2O_annat/M_H2O; % Totalt H2O innehåll i "övrigt"
(mol)
E_H2O_annat = mol_H2O_annat*E_H2O_mol_tot; % Total energi för uppvärmning,
förångning och överhettning av H2O innehåll i "övrigt" (J/mol)

massa_H2O_efs = 1000*(1-torrhalt)/torrhalt; % Totalt H2O innehåll i 1000 g
elfilterstoft (g)
mol_H2O_efs = massa_H2O_efs/M_H2O; % Totalt H2O innehåll i elfilterstoftet
(mol)
E_H2O_efs = mol_H2O_efs*E_H2O_mol_tot; % Total energi för uppvärmning,
förångning och överhettning av H2O innehåll i "övrigt" (J/mol)

% Luft (CO2+3.76N2) % TD s. 769
% V=ZNRT/P <==> N=VP/ZRT % thermodynamics s. 695
V=50000/13; % Gas genom skorstenen (m^3)

P=101.33; % Lufttryck (kPa) thermodynamics table A-16
Z=1;
R=8.314*10^-3; % (kPa*m^3/(molK))
T=T_ut_gas; % (K)
mol_gas = V*P/(Z*R*T); % Gas genom skorsten (mol), ska ändras till en
uträknad mängd utifrån oljeförbrukningen
mol_luft = mol_gas-mol_CO2-mol_H2O; % Luft in i ugn (mol)

E_luft_mol = 28.11*(T_ut_gas-T_in_gas)+0.19*10^-2/2*(T_ut_gas^2-
T_in_gas^2)+0.4802*10^-5/3*(T_ut_gas^3-T_in_gas^3)-1.1966*10^-
9/4*(T_ut_gas^4-T_in_gas^4); % Energi/mol för att värma luften (J/mol)
E_luft = E_luft_mol*mol_luft; % Total energi för att värma luften (J)

%
E_tot = E_CaCO3+E_H2O+E_CO2+E_CaO+E_Ca3PO42+E_annat; % Energi som går åt
för att värma allt (J)

% Förluster
E_in = 6.2*10^9; % Energi per ton kalk (J)
E_fl_skorsten = E_luft-E_CO2_1-E_H2O_2; % Förluster genom skorsten (J)
E_fl_ledning = E_in-E_tot-E_fl_skorsten; % Ledningsförluster genom ugnsrör
(J)

E_fl = E_fl_ledning+E_fl_skorsten;
E_tot_1 = E_CaCO3_uppvärmning+E_H2O+E_CaO_1+E_Ca3PO42_1+E_annat_1; % Energi
för att värma allt till maximal temperatur

% Allokering av förluster och total energi
% Ca3(PO4)2
E_Ca3PO42_fl = E_fl*(E_Ca3PO42_1+E_H2O_Ca3PO42)/E_tot_1; % Förluster
allokerade till Ca3(PO4)2 (J)
E_Ca3PO42_tot = E_Ca3PO42_fl+E_Ca3PO42+E_H2O_Ca3PO42; % Total energi för
Ca3(PO4)2
E_P_procent = E_Ca3PO42_tot/(andel_P*100); % Energi per procent fosfor (J)

```

```

% CaO
E_CaO_fl = E_fl*(E_CaCO3_uppvarmning+E_CaO_1+E_H2O_CaCO3)/E_tot_1; %
Förluster allokerade till CaO (J)
E_CaO_tot = E_CaO_fl+E_CaO+E_CaCO3+E_H2O_CaCO3+E_CO2; % Total energi för
CaO
E_CaO_procent = E_CaO_tot/(andel_CaO*100); % Energi per procent CaO (J)
% Övrigt
E_annat_fl = E_fl*(E_annat_1+E_H2O_annat)/E_tot_1; % Förluster allokerade
till "övrigt" (J)
E_annat_tot = E_annat_fl+E_annat+E_H2O_annat; % Total energi/mol för
"övrigt" (J)
E_annat_procent = E_annat_tot/((massa_annat/massa_kalk)*100); % Energi per
massprocent "övrigt" (J)


% Köpkalk
energipris = 550*9.6/(41.868*10^9); % Uppskattat pris olja (kr/J)
beckolja_flode = 1.885; % ton/h
beckolja_ef = 6.3*11; % (GJ/h) 6,3 GJ/ton kalk; 11 ton kalk/h
beckolja_energi = beckolja_ef/beckolja_flode; % (GJ/ton)
beckolja_pris = 4000; % (kr/ton)
beckolja_energipris = beckolja_pris/beckolja_energi*10^-9; % (kr/J)
eo3_energi = 37303; % (MJ/m3) Källa: Järnkontorets energihandbok
eo3_pris = 4000; % (kr/m3)
eo3_energipris = eo3_pris/eo3_energi*10^-6; % (kr/J)

E_eo3 = eo3_energi/1000*2515;
E_beckolja = beckolja_energi*12642;
andel_beckolja = E_beckolja/(E_beckolja+E_eo3);
andel_eo3 = E_eo3/(E_beckolja+E_eo3);
energipris = andel_beckolja*beckolja_energipris+andel_eo3*eo3_energipris;

pris_ton_kalk = energipris*6.2*10^9;
M = (M_CaCO3/M_CaO)*0.94+0.06;
E = E_P_procent*0.20+E_CaO_procent*94+E_annat_procent*(100-0.20*kvot-94);
kostnad = E*energipris;
p_mesa = (1530-kostnad)/M;
E_elfilterstoft = E_CaCO3_efs+E_H2O_efs; % Energiåtgång för ett kg
elfilterstoft

```

## Bilaga 3

% Beräkning av fosforhalt - David Olsson  
% 1.068361918191905e+08

```
clear all  
close all  
clc
```

```
mesa_P = 0.0093; % Fosforhalt i mesan  
kalk_P = 0.0123; % Fosforhalt i kalken  
precoat_tid = 13/60; % (h)  
precoat_flode = 20; % (m3/h)  
precoat_intervall = 7; % (h)  
precoat_densitet = 1190; % (kg/m3)  
precoat_torrhalt = 0.15; % Torrhalt  
kalk_flode = 13; % Massflöde kalk (ton/h)  
M_CaCO3 = 100.09; % (g/mol)  
M_CaO = 56.08; % (g/mol)  
M_CaOH2 = 74.10; % (g/mol)  
M_P2O5 = 141.94; % (g/mol)  
M_P = 30.97; % (g/mol)
```

```
precoat_vol_flode = precoat_tid*precoat_flode/precoat_intervall; %  
Genomsnittligt volymflöde av mesa till precoat (m3/h)  
precoat_vikt_flode = precoat_vol_flode*precoat_densitet; % Genomsnittligt  
massflöde av mesa till precoat (kg/h)  
precoat_t_flode = precoat_vikt_flode*precoat_torrhalt; % Genomsnittligt  
massflöde av torrsubstans till precoat (kg/h)  
precoat_t_flode_kalk = precoat_t_flode/kalk_flode; % Genomsnittligt  
massflöde av torrsubstans till precoat per ton kalk (kg/ton kalk)  
inflode_P = precoat_t_flode_kalk*mesa_P; % Genomsnittligt inflöde av fosfor  
(kg/ton kalk)
```

```
% utblodning_vikt_flode = 1.8; % (kg/ton kalk)  
stoft_P = 0.0222; % Andel fosfor i stoft  
ersattning_P = 0.005/M_P2O5*2*M_P; % Ersättningskalkens innehåll av fosfor  
(viktprocent)  
ersattning_CaO_p = 0.94; % Ersättningskalkens innehåll av CaO (viktprocent)  
stoft_CaCO3 = 0.7647;  
stoft_CaO = 0.0530;  
stoft_CaOH2 = 0.0303;  
stoft_Ca_sum = stoft_CaCO3+stoft_CaO+stoft_CaOH2;  
stoft_P1 = zeros(1:2);  
stoft_P1(1) = stoft_P;  
stoft_P_k = stoft_P/mesa_P;  
stoft_CaCO3_k = stoft_CaCO3/stoft_Ca_sum;  
stoft_CaO_k = stoft_CaO/stoft_Ca_sum;  
stoft_CaOH2_k = stoft_CaOH2/stoft_Ca_sum;
```

```
i=1;  
for utblodning_vikt_flode=0:0.01:8  
    mesa_d=1;  
    ersattning_CaO(i) = 0;  
    mesa_P1 =  
(inflode_P+ersattning_CaO(i)/ersattning_CaO_p*ersattning_P)/(precoat_t_flode_kalk+stoft_P_k*utblodning_vikt_flode); % Torrsubstansens fosforinnehåll  
(viktandel)  
    j=0;
```

```

while mesa_d>0.00001
    mesa_P2 = mesa_P1;
%    mesa_P1 =
    (inflode_P+ersattning_CaO(i)/ersattning_CaO_p*ersattning_P)/(precoat_t_flod
    e_kalk+stoft_P_k*utblodning_vikt_flode); % Torrsubstansens fosforinnehåll
    (viktandel)
    stoft_P1 = mesa_P1*stoft_P_k; % Stoftets fosforinnehåll (viktandel)
    stoft_Ca = 1-(1-stoft_Ca_sum)*mesa_P1/mesa_P; % Stoftets
    kalciuminnehåll (viktandel)

    utblodning_Ca = stoft_Ca*utblodning_vikt_flode; % Utblödningens
    kalciuminnehåll (kg)
    utblodning_CaCO3 = utblodning_Ca*stoft_CaCO3_k; % Utblödningens
    CaCO3-innehåll (kg)
    utblodning_CaO = utblodning_Ca*stoft_CaO_k; % Utblödningens CaO-
    innehåll (kg)
    utblodning_CaOH2 = utblodning_Ca*stoft_CaOH2_k; % Utblödningens
    CaOH2-innehåll (kg)
    ersattning_CaO(i) = utblodning_CaO +
    utblodning_CaCO3/M_CaCO3*M_CaO+utblodning_CaOH2/M_CaOH2*M_CaO; %
    Motsvarande mängd CaO som blöds ut (kg)
    mesa_P1 =
    (inflode_P+ersattning_CaO(i)/ersattning_CaO_p*ersattning_P)/(precoat_t_flod
    e_kalk+stoft_P_k*utblodning_vikt_flode); % Torrsubstansens fosforinnehåll
    (viktandel)
    mesa_d = abs(mesa_P1-mesa_P2);
    j=j+1;
end
utblodning(i) = utblodning_vikt_flode;
mesa_fosfor(i) = mesa_P1*100;
i=i+1;
end

% Lägg till energiförlust för elfilterstoftet
kalk_P1 = kalk_P/mesa_P*mesa_fosfor;
E_mesaugn_procent = 9.27285955213289e+07;
E_mesaugn = E_mesaugn_procent*kalk_P1;
E_efs = 9.198247022794365e+05; % Energi för att värma 1 kg elfilterstoft

%
energipris = 550*9.6/(41.868*10^9); % Uppskattat pris olja (kr/J)
beckolja_flode = 1.885; % ton/h
beckolja_ef = 6.3*11 ; % (GJ/h) 6,3 GJ/ton kalk; 11 ton kalk/h
beckolja_energi = beckolja_ef/beckolja_flode; % (GJ/ton)
beckolja_pris = 4248; % (kr/ton)
beckolja_energipris = beckolja_pris/beckolja_energi*10^-9; % (kr/J)
eo3_energi = 37.303; % (GJ/m3) Källa: Järnkontorets energihandbok
eo3_pris = 4631; % (kr/m3)
eo3_energipris = eo3_pris/eo3_energi*10^-9; % (kr/J)
E_eo3 = eo3_energi*2515;
E_beckolja = beckolja_energi*12642;
andel_beckolja = E_beckolja/(E_beckolja+E_eo3);
andel_eo3 = E_eo3/(E_beckolja+E_eo3);
energipris_tot =
andel_beckolja*beckolja_energipris+andel_eo3*eo3_energipris;

energikostnad = E_mesaugn*energipris_tot;

energiforlust = E_efs*utblodning;
energiforlust_kr = energiforlust*energipris_tot;

```

```

kalkpris = 1.53; % (kr/kg)
kalkkostnad = ersattning_CaO/ersattning_CaO_p*kalkpris; % (kr/kg)
deponeringspris = 0.1; % (kr/kg)
deponeringskostnad = deponeringspris*utblodning;
kostnad = energikostnad+kalkkostnad+deponeringskostnad+energiforlust_kr; %
Totalkostnad för att värma upp fosfor + att ersätta stoft med kalk (kr/ton
kalk)
besparing = kostnad(1)-kostnad;

plot(utblodning,kalk_P1)
figure
plot(utblodning,besparing)
figure
plot(utblodning,besparing*kalk_flode*24*300)

max_besparing = max(besparing);
max_utblodning = utblodning(find(besparing==max(besparing)));
max_tot = max_besparing*kalk_flode*24*300;
max_utblodning_tot = max_utblodning*kalk_flode*24*300/1000; %ton

fprintf('Maximal besparing: %.2f kr/ton kalk vid utblödningen %.2f kg/ton
kalk. Total besparing: %.0f kr \nUtblodning/år: %.0f ton\n\n
',max_besparing,max_utblodning,max_tot,max_utblodning_tot)

```

## Bilaga 4

Prover	P	Na	CaCO <sub>3</sub>	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaO
1. Kalk	1,29%	1,65%			
2. Kalk	1,31%	1,62%			
3. Kalk	1,09%	1,77%			
1. Mesa	0,93%	1,07%	90,2%	5,5%	0,1%
2. Mesa	1,00%	1,00%	84,3%	3,1%	6,4%
3. Mesa	0,85%	1,01%	90,6%	1,7%	<0,1%
1.1 Stoft	1,75%	1,84%	82,9%	2,6%	<0,1%
2.1 Stoft	1,94%	1,54%	84,3%	5,7%	2,8%
3.1 Stoft	1,66%	1,92%	84,2%	3,7%	<0,1%
1.2 Stoft	1,84%	2,44%	72,3%	2,9%	5,3%
2.2 Stoft	2,35%	2,49%	78,8%	2,9%	<0,1%
3.2 Stoft	2,48%	3,16%	78,3%	3,3%	<0,1%

## Bilaga 5

Längd (m)	Yttemperatur (°C)
0	600
5	750
10	825
15	925
20	1000
25	1025
30	1050
35	1100
40	1125
45	1175
50	1200
55	1275
60	1325
65	1400
70	1550
74	1700
76	1600
80	1000
82	700



SLU  
Institutionen för energi och teknik  
Box 7032  
750 07 UPPSALA  
Tel. 018-67 10 00  
pdf.fil: [www.slu.se/energioghteknik](http://www.slu.se/energioghteknik)

SLU  
Department of Energy and Technology  
P. O. Box 7032  
SE-750 07 UPPSALA  
SWEDEN  
Phone +46 18 671000